



BACHELORARBEIT

MODULATION DER GALAKTISCHEN KOSMISCHEN STRAHLUNG DURCH SONNENAKTIVITÄT UND IHR EINFLUSS AUF DIE WOLKENBEDECKUNG DER ERDE

Verfasserin

Mag. Eva Freistetter MSc.

angestrebter akademischer Grad

Bachelor of Science (BSc)

Wien, 2026

Studienkennzahl lt. Studienblatt: UA 033 661

Fachrichtung: Astronomie

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. Arnold Hanslmeier

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Grundlagen und historischer Kontext	3
1.2	Die Bedeutung kosmischer Strahlung in der Astronomie und der Teilchenphysik . . .	5
1.3	Die kosmische Strahlung und das Klima der Erde	7
1.4	Zielsetzung der Bachelorarbeit	7
2	Physikalische Grundlagen	9
2.1	Einteilung, Ursprung und Energiespektrum der kosmischen Strahlung	9
2.2	Zusammensetzung der kosmischen Strahlung	10
2.3	Solare Modulation der galaktischen kosmischen Strahlung	11
2.3.1	Sonnenaktivität	11
2.3.2	Heliosphärisches Magnetfeld und Forbush-Effekt	12
2.4	Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität, kosmische Strahlung und Klima	13
3	Die GCR-Wolken-Hypothese	15
3.1	Die Arbeiten von Svensmark et al.	16
4	Entstehung eines Konsens zur GCR-Wolken-Hypothese	19
4.1	Literaturanalyse	19
4.1.1	Methodik	19
4.1.2	Resultate der Literaturanalyse	21
4.2	Entwicklung eines wissenschaftlichen Konsens	23
4.3	Experimentelle Untersuchungen: CLOUD Experiment am CERN	24
4.3.1	Versuchsaufbau und experimentelle Durchführung	25
4.3.2	Wesentliche Ergebnisse	27
4.4	Die GCR-Wolken-Hypothese in den Sachstandsberichten des IPCC	29
5	Diskussion	32
6	Fazit und Ausblick	34
7	Literatur	35
A	Anhang	42

Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird die Hypothese untersucht, dass die durch die Sonnenaktivität modulierte galaktische kosmische Strahlung die Wolkenbildung in der Erdatmosphäre und somit das Klima beeinflusst. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung des wissenschaftlichen Konsenses zur sogenannten GCR-Wolken-Hypothese seit den Arbeiten von Svensmark und Friis-Christensen aus den späten 1990er Jahren. Nach einer Darstellung der physikalischen Grundlagen der kosmischen Strahlung, ihrer solaren Modulation sowie des postulierten Mechanismus der ioneninduzierten Aerosolbildung wird die wissenschaftliche Rezeption der Hypothese analysiert. Dazu wurden 194 referierte Publikationen, die Svensmarks Arbeit von 1998 zitieren, anhand eines eigens entwickelten Bewertungssystems klassifiziert. Ergänzend werden die Ergebnisse des CLOUD-Experiments am CERN sowie die Bewertungen der Hypothese in den Sachstandsberichten des IPCC untersucht. Die Analyse zeigt, dass ionisierende Strahlung unter bestimmten Bedingungen zur Bildung atmosphärischer Aerosolpartikel beitragen kann. Der Einfluss der durch den Sonnenzyklus verursachten Änderungen der kosmischen Strahlung auf die Konzentration von Wolkenkondensationskernen ist jedoch sehr gering. Seit etwa 2014 besteht daher ein weitgehender wissenschaftlicher Konsens, dass die galaktische kosmische Strahlung keinen relevanten Beitrag zur gegenwärtigen globalen Erwärmung leistet.

1 Einleitung

1.1 Grundlagen und historischer Kontext

Kosmische Strahlung bezeichnet einen Fluss hochenergetischer geladener Teilchen, der kontinuierlich auf die Erdatmosphäre trifft. Ihre Entdeckung vor über 110 Jahren durch Viktor Hess [37] markierte einen bedeutenden Fortschritt in der Entwicklung der modernen Physik und Astrophysik. Sie führte unter anderem zur Entwicklung experimenteller Methoden wie der fotografischen Emulsionsplatten, die von Marietta Blau [3] am Wiener Radiuminstitut maßgeblich vorangetrieben wurden. Mit diesen Methoden gelang erstmals der Nachweis der Zertrümmerung von Atomkernen durch hochenergetische kosmische Strahlung. Darüber hinaus trug die Erforschung kosmischer Strahlung zur Entwicklung weiterer grundlegender Verfahren bei, darunter die Radiokarbonmethode sowie die Massenspektrometrie.

Die Untersuchung kosmischer Strahlung liefert zentrale Erkenntnisse über hochenergetische Prozesse im Universum sowie über den Ursprung und die Zusammensetzung der Materie. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre wechselwirken die primären Teilchen mit Luftmolekülen und erzeugen Kaskaden sekundärer Teilchen, sogenannte Teilchenschauer. Die Analyse dieser sekundären Teilchen erlaubt Rückschlüsse auf die Eigenschaften der primären kosmischen Strahlung und damit auf ihre astrophysikalischen Quellen.

Die Existenz der kosmischen Strahlung wurde im Jahr 1912 vom österreichischen Physiker Victor Franz Hess entdeckt. Sein Ziel war damals ein besseres Verständnis der ionisierenden Strahlung (Strahlung mit ausreichend Energie, um Elektronen vom Atomkern zu lösen), die überall auf der Erde gemessen worden war.

Nach der Entdeckung der Radioaktivität durch Antoine Henri Becquerel am Ende des 19. Jahrhunderts ging man allgemein davon aus, dass die Ionisierung der Atome der Luft durch die Strahlung radioaktiver Elemente im Boden verursacht wird. Bei seinen Experimenten hat Hess die elektrische

Leitfähigkeit der Luft in unterschiedlichen Höhen über dem Meeresspiegel gemessen. Durch mehrere Ballonfahrten konnte er zuerst, wie erwartet, feststellen, dass die Leitfähigkeit sinkt, je weiter man sich vom Boden entfernt. Ab einer Höhe von circa 1000 Meter hingegen nahm sie wieder zu, woraus er schloss, dass auch die Ionisierung steigen muss, denn nur wenn die Atome der Luft ionisiert werden, können sie elektrischen Strom leiten. Das stand im Widerspruch zur damaligen Ansicht, dass ionisierende Strahlung vor allem von radioaktiven Atomen im Gestein, also erdgebunden erzeugt wird. Hess konnte parallel zum Anstieg der Leitfähigkeit auch einen Anstieg der Intensität radioaktiver Strahlung mit der Höhe nachweisen [34].

Aus seinen Daten schloss Hess auf die Existenz ionisierende Strahlung, die nicht vom Boden, sondern aus dem Weltall kommt [37]:

”Die Ergebnisse der vorliegenden Beobachtungen scheinen am ehesten durch die Annahme erklärt werden zu können, daß eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft von oben her in unsere Atmosphäre eindringt und auch noch in deren untersten Schichten einen Teil der in geschlossenen Gefäßen beobachteten Ionisation hervorruft.”

Der deutsche Physiker Werner Kolhörster konnte durch eigene Experimente mit Ballonfahrten in bis zu 9300 Meter Höhe die Messungen von Hess bestätigen [48]. Demnach verursachte eine unbekannte Strahlung mit extrem hoher Durchdringungskraft die Ionisierung. Zu diesem Zeitpunkt war die Existenz dieses vorerst als „Höhenstrahlung“ bezeichneten Phänomens unbestritten, seine Natur aber noch unbekannt. Der amerikanische Physiker Robert Millikan versuchte den Nachweis zu bringen, dass die Höhenstrahlung vor allem aus Gammastrahlung (Gamma-Photonen) besteht, die im interstellaren Medium bei der Entstehung von Helium entstehen (eine Annahme, die nicht korrekt war und der Physik widerspricht, da Kernfusion nur bei hohen Temperaturen und Dichten, wie sie in Sternen vorherrschen stattfindet). Da er bei seinen Messungen weder eine Schwankung in der Tageszeit wahrnahm, noch unterschiedliche Richtungen ausmachen konnte, ging er von einem kosmischen Ursprung aus. Um diesen kosmischen Ursprung zu betonen und weil es sich seiner Ansicht nach um elektromagnetische Strahlung handelte, wählte er die Bezeichnung “kosmische Strahlung” [57].

Beinahe zeitgleich (1927) beobachtete der niederländische Physiker Jacob Clay bei einer Reise von Java in die Niederlande jedoch, dass die Intensität der kosmischen Strahlung mit der geographischen Breite variiert und am magnetischen Äquator geringer ist [12], was für eine Teilchennatur der kosmischen Strahlung sprach. Ein geladenes Teilchen mit Ladung q und Geschwindigkeit $\vec{v}$ wird in einem Magnetfeld $\vec{B}$ aufgrund der Lorentzkraft $\vec{F}$ abgelenkt:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Photonen (der Gammastrahlung) erfahren diese Ablenkung nicht, geladene Protonen und Elektronen hingegen schon. Besteht die kosmische Strahlung aus geladenen Teilchen bedeutet das, dass sie vom Magnetfeld der Erde abgelenkt und somit am Äquator, wo sie senkrecht zum Magnetfeld ($\vec{v} \perp \vec{B}$) eintrifft, am stärksten abgelenkt wird. [34]

Walter Bothe und Werner Kohlhörster führten 1929 ein Experiment mit zwei Geiger-Müller Zählrohren durch. Ziel war der Nachweis, dass die kosmische Strahlung aus Gammastrahlung besteht. Bei der Koinzidenzmessung wurden aber beide Zählrohre gleichzeitig ausgelöst, was auf Teilchen hindeutet, da eine Strahlung nur einzelne Ereignisse ausgelöst hätte. Da selbst ein Block aus

Gold als Absorber die Koinzidenzen erhielt, konnte die kosmische Strahlung primär nicht aus Gammastrahlung bestehen [4].

Seitdem bezieht sich der Begriff der kosmischen Strahlung auf die Teilchenstrahlung aus dem All. Die ebenfalls existierende kosmische Gammastrahlung ist dabei im Allgemeinen nicht mitgemeint. Der Begriff „kosmische Strahlung“ ist heute ein Sammelbegriff für hochenergetische Teilchen, die aus dem Weltall permanent auf die Erdatmosphäre trifft. Sie besteht aus Protonen, α -Teilchen (He-Kernen) und β -Strahlung (freie Elektronen), die aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeiten relativistisch sind und ihre Ruheenergie weit übertreffen. Teilchen, die aus Quellen außerhalb des Sonnensystems stammen, werden als galaktische kosmische Strahlung (GCR) bezeichnet. Über die genauen Eigenschaften und die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung wird in Kapitel 2.1 eingegangen.

1.2 Die Bedeutung kosmischer Strahlung in der Astronomie und der Teilchenphysik

Für das Verständnis der modernen Astronomie ist die kosmische Strahlung von großer Bedeutung. Mit der Entdeckung der kosmischen Strahlung und dem Positron (in der kosmischen Strahlung) zeigte sich ihre Bedeutung für die Wissenschaft. Nachdem weiterer Elementarteilchen wie das Neutron [10] und das Myon [59] entdeckt wurden, eröffnete sich ein gänzlich neues Feld für die Physik und für die Astronomie in Form der Astroteilchenphysik. Dieser Abschnitt gibt an dieser Stelle einen kurzen Überblick über die Entwicklung der entsprechenden Teilgebiete.

- In der Astronomie und Astrophysik hat die Untersuchung kosmischer Strahlung eine weitreichende Bedeutung. Sie liefert Informationen über hochenergetische Prozesse in Supernova-Überresten, die Struktur und Dynamik galaktischer Magnetfelder sowie über Transportprozesse in der Heliosphäre. Darüber hinaus ermöglicht die Analyse der solaren Modulation Rückschlüsse auf die zeitliche Entwicklung des heliosphärischen Magnetfeldes und trägt zum Verständnis der Wechselwirkung zwischen Sonne und interstellarem Medium bei.
- Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Bestimmung des Alters von Meteoriten: Kosmische Strahlung wechselwirkt mit Materie und löst eine Spallationsreaktion (nichtelastische Wechselwirkung) aus. Bei einer nuklearen Spallation trifft ein hochenergetisches Teilchen mit mehr als 100 MeV (Protonen, Neutronen) auf einen Atomkern, wodurch dieser in Bruchstücke und mehrere Neutronen zerbricht. Dies passiert, wenn kosmische Strahlung im All auf Himmelskörper trifft, die nicht durch eine Atmosphäre oder ein Magnetfeld geschützt werden, und verursacht so Veränderungen der Oberfläche (Weltallverwitterung). Die kosmische Strahlung kann auch Atomkerne im Gestein von Meteoriten zertrümmern und dadurch die Isotopenzusammensetzung verändern. Aus entsprechenden Messungen kann man ableiten, wie lange ein Objekt der kosmischen Strahlung im All ausgesetzt war. Im Fall von Meteoriten eröffnet das die Möglichkeit, das sogenannte „Strahlungsalter“ zu bestimmen, also die Zeit, die ein Meteorit vor seinem Einschlag auf der Erde im All verbracht hat, nachdem er sich von seinem Ursprungsasteroid gelöst hat [22].
- Bevor man in der Lage war, Teilchenbeschleuniger zu bauen, die Energien im GeV-Bereich erreichen konnten, war die kosmische Strahlung die einzig verfügbare Quelle für hochenergetische Teilchen und die einzige Möglichkeit, Experimente in diesem Energiebereich durchzuführen.

Ein Beispiel dafür ist die Entdeckung des Positrons durch Carl David Anderson im Jahr 1932. Paul Dirac hatte im Jahr 1929 ein Anti-Teilchen des Elektrons postuliert [18]. Anderson stellte Experimente mit einer Nebelkammer an, in der eine übersättigte Mischung aus Luft und Alkohol stark gekühlt wird. Wenn ein geladenes Teilchen mit hoher kinetischer Energie dieses Gas durchquert, erzeugt es dabei Ionen, die als Kondensationskerne für die Bildung von Tropfen wirken (dieser Prozess wird ausführlich in Kapitel 3 erklärt). Mittels einer Nebelkammer konnte Anderson Teilchenkollisionen mit der kosmischen Strahlung und deren Zerfallsprodukte sichtbar machen. Er entdeckte dabei das Positron [2] und erhielt dafür 1936 den Nobelpreis für Physik, gemeinsam mit Victor Franz Hess der für die Entdeckung der kosmischen Strahlung geehrt wurde. Anderson war es auch, der gemeinsam mit Seth Neddermeyer 1936 in der kosmischen Strahlung das Myon entdeckte ([59, 34]).

- Die Erforschung der kosmischen Strahlung führte auch zu verbesserter Messgenauigkeit und der Entwicklung neuer Messmethoden. Exemplarisch dafür steht die von der österreichischen Physikerin Marietta Blau entwickelten photographische Methode zusammen mit ihrer Mitarbeiterin Hertha Wambacher. Davor hatte man zum Nachweis die Szintillationsmethode verwendet, die sehr fehleranfällig war, da hier die auftretenden Lichtblitze gezählt wurden. Blau hingegen setzte auf photographische Platten mit speziell entwickelten Fotoemulsionen, die die Bahnen auftretender Alpha-Teilchen und schnellen Protonen sichtbar machen sollten und dabei andere, weniger energiereiche Ereignisse (Beta- und Gammastrahlen) ausschließen. Die notwendige Empfindlichkeit der Fotoplatten erreichten sie nach mehreren Versuchen und in Zusammenarbeit mit der englischen Firma Ilford, die fotografische Emulsionen herstellte. Ihre Fotoplatten wurden auf dem Hafelekar in 2300 Meter Höhe über vier Monate hinweg der kosmischen Strahlung ausgesetzt und zeigten langgezogene Bahns Spuren. Brom und Argon in der Emulsion der Platten zerfielen aufgrund der Wechselwirkung mit der kosmischen Strahlung und es bildeten sich strahlenförmige Bahns Spuren, welche auf die hohe Energie der Strahlung hinwiesen (“Zertrümmerungssterne”). Blau und Wambacher identifizierten sie als Spuren von hochenergetischen kosmischen Protonen und konnten anhand der Länge der Bahnen auch ihre Energie ermitteln. Damit konnte gleichzeitig auch erstmals der Zerfall schwerer Kerne belegt werden ([3, 79]).
- Die im vorherigen Abschnitt genannte Spallation findet auch in der Erdatmosphäre statt und lässt dort kosmogene Nuklide entstehen. Die Teilchen der kosmischen Strahlung erzeugen bei Kollisionen mit Atomen der Atmosphäre durch den Prozess der Spallation freie Neutronen. Der Einfang so eines Neutrons durch das Stickstoff-Isotop ^{14}N führt zu einem Zerfall, bei dem ^{14}C (und ein Proton) freigesetzt wird. Dies ist der Hauptidezeugungsmechanismus des Kohlenstoffisotops ^{14}C , das in den oberen Schichten der Atmosphäre immer wieder neu gebildet wird. Mit der Radiokarbonmethode (C14-Datierung) lässt sich das Alter organischer Materialien bestimmen. Sie basiert auf dem Zerfall des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C . Seine Halbwertszeit liegt bei 5730 (± 40) Jahren. Da ^{14}C kontinuierlich von Lebewesen aufgenommen wird und dieser Prozess mit dessen Tod endet, sinkt ab diesem Zeitpunkt der ^{14}C -Anteil exponentiell, woraus sich das Alter organischer Materialien bestimmen lässt.

Die eben genannten Beispiele zeigen exemplarisch die Bedeutung der kosmischen Strahlung in der Wissenschaft. Die Erforschung der kosmischen Strahlung selbst ist aber über hundert Jahre nach ihrer Entdeckung noch lange nicht abgeschlossen. Es bleiben unterschiedlichste offene Fragen. Bis heute ist zum Beispiel nicht gänzlich geklärt, aus welchen Quellen der hochenergetische Anteil der kosmischen Strahlung stammt und welche Mechanismen diese Teilchen produzieren.

1.3 Die kosmische Strahlung und das Klima der Erde

Bei der Erforschung der kosmischen Strahlung zeigte sich früh, dass ihre Intensität nicht konstant ist, sondern mit der Sonnenaktivität schwankt. 1937 entdeckte Scott E. Forbush erstmals eine Modulation der galaktischen kosmischen Strahlung durch die Sonnenaktivität. Dabei zeigte sich, dass die Intensität der kosmischen Strahlung mit zunehmender Sonnenaktivität abnimmt. Insbesondere starke solare Ereignisse, die mit intensiven Sonnenwinden und koronalen Massenauswürfen einhergehen, können zu einem plötzlichen Rückgang der gemessenen kosmischen Strahlung führen. Dieses Phänomen wird als Forbush-Decrease bezeichnet [34]. (Auf Details über diese Ereignisse und den dahinterliegenden physikalischen Mechanismen wird in Kapitel 2.3.2 eingegangen.)

In Hinblick auf die Modulation der kosmischen Strahlung zeigte sich zudem der elfjährige Sonnenzyklus und die damit verbundenen Variationen der Sonnenaktivität als wesentlicher Faktor (siehe Abschnitt 2.3.1).

Auf Grundlage der Aufzeichnungen zur Sonnenaktivität und ihren Zyklen wurde bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts ein möglicher Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und klimatischen beziehungsweise meteorologischen Prozessen auf der Erde diskutiert. Diese Fragestellung wurde im 20. Jahrhundert um die Fragestellung erweitert, ob die Modulation der kosmischen Strahlung ein weiterer, bisher unbekannter Einflussfaktor sein könnte. Während jedoch der Einfluss der Sonnenaktivität auf die kosmische Strahlung durch physikalisch gut verstandene Prozesse in der Heliosphäre beschrieben werden konnte, war der Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und Klima deutlich weniger geklärt.

Einen erneuten Impuls erhielt dieses Forschungsfeld 1997 durch die Arbeiten von Svensmark ([87, 84]), der die Hypothese formulierte, dass Variationen der Sonnenaktivität über die Modulation der kosmischen Strahlung die Wolkenbildung beeinflussen und, in Folge klimatische Veränderungen bewirken könnten. Die so genannte GCR-Wolken-Hypothese ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

1.4 Zielsetzung der Bachelorarbeit

Die von Svensmark et al. [87, 84] aufgestellte Hypothese über einen Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität, galaktischer kosmischer Strahlung und dem Klima der Erde hat weit über die Astrophysik hinaus Aufmerksamkeit bekommen. Zum Zeitpunkt ihrer ersten Veröffentlichung war das Thema sowohl wissenschaftlich als auch gesellschaftlich relevant. Während die Modulation der kosmischen Strahlung durch die Sonnenaktivität gut belegt und verstanden war, war der Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und Wolkenbildung und der Einfluss auf das Erdklima noch unklar. Aus wissenschaftlicher Sicht zeigte sich, dass viele Prozesse und Mechanismen dahinter noch nicht gut verstanden waren. Die Untersuchung dieser bisher unbekannten Zusammenhänge waren insofern von Bedeutung, da die GCR-Wolken-Hypothesen neue Erkenntnisse über das Verhalten der Erdatmosphäre versprach, sowie ein besseres Verständnis der menschlichen Rolle angesichts des Klimawandels in Aussicht stellte. Diese Mischung aus wissenschaftlicher und gesellschaftspolitischer Relevanz unterscheidet die GCR-Wolken-Hypothese von anderen naturwissenschaftlichen Forschungsthemen. Die Wissenschaft sollte sich in solchen Fällen besonders sorgfältig damit auseinandersetzen um auch der gesellschaftlichen und politischen Bedeutung des Themas gerecht zu werden.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es daher, einen Überblick über die Entwicklung des wissenschaftlichen Konsens zum Einfluss der kosmischen Strahlung auf die Wolkenbildung in der Erdatmosphäre zu geben. Dabei soll dargestellt werden, wie sich die Beurteilung der GCR-Wolken-Hypothese

im Kontext des Klimawandels zwischen 1998 und der Gegenwart verändert hat und welche Fragen heute noch ungeklärt oder umstritten sind.

Dazu soll eine umfassende Literaturanalyse durchgeführt werden, die zeigt, wie die GCR-Wolken-Hypothese von der Fachwelt aufgenommen, untersucht und bewertet wurde. Anhand von Zitierungen der Arbeit von Svensmark und einem Bewertungssystem soll eine Einordnung im Umgang der Wissenschaft mit der Hypothese erfolgen. Anschließend erfolgt eine Betrachtung der experimentellen Untersuchung durch das CLOUD-Experiment (Cosmics Leaving Outdoor Droplets) am Cern. Das eigens zur Überprüfung des Zusammenhangs kosmische Strahlung und Modulation durch Sonnenaktivität auf die Wolkenbildung entwickelte Experiment, simuliert die Atmosphäre und die Aerosolbildung und kann die Variation der kosmischen Strahlung unter Laborbedingungen replizieren. Danach wird die Darstellung der Konsensbildung durch die Bewertung der Hypothese in den Sachstandsberichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) abgeschlossen.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Einteilung, Ursprung und Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Die äußeren Zonen der Erdatmosphäre sind einem permanenten Einfall von Teilchen aus dem Welt-
raum ausgesetzt. Dabei handelt es sich sowohl um geladene Teilchen (Atomkerne, freie Elektronen)
und ungeladene Neutrinos sowie hochenergetischen Photonen (γ - Strahlung). Die Teilchen der
kosmischen Strahlung werden in eine solare und eine galaktische beziehungsweise extragalaktische
Komponente unterteilt (siehe z.B. [34, 30]). Sie unterscheiden sich nicht nur in ihrer Herkunft,
sondern neben ihrer Richtungsverteilung auch in ihrem Energiespektrum und in ihrer Zusammen-
setzung, der relativen Häufigkeit der Elemente.

Die **solare kosmische Strahlung** (*solar cosmic rays*, SCR) besteht aus niederenergetischen
Teilchen. Sie stammt zum einen aus dem kontinuierlichen Sonnenwind und zum anderen aus den
eruptiven Ereignissen der Sonne, wie Flares oder koronalen Massenauswürfen. Der Sonnenwind ist
ein annähernd kontinuierlicher Teilchenstrom, der von der Sonne in alle Richtungen abgegeben wird.
Wie die geladenen Teilchen des solaren Plasmas in der Chromosphäre und der Korona der Sonne
beschleunigt und abgestoßen werden, ist im Detail noch nicht verstanden. Die Zusammensetzung
des Sonnenwinds besteht zum Großteil aus Protonen und Elektronen (ionisierter Wasserstoff) und
zu circa 8 % aus α -Teilchen (Atomkerne von ^4He). Die Geschwindigkeit dieses Plasmas, das einen
Teil des solaren Magnetfeldes mit sich führt, schwankt zwischen 300 km/s und 700 km/s. In der
Nähe der Erdbahn misst man eine Protonendichte von circa 9 ± 6 pro cm^3 , die Teilchenintensität
beträgt $2 \cdot 10^8$ Ionen/ $(\text{cm}^2 \text{s})$ und Geschwindigkeiten von circa 500 km/s ([36, 34]). Die Variabilität
des Sonnenwindes wird durch die solare Aktivität verursacht. Eine ausführliche Betrachtung der
Variabilität der Sonnenaktivität erfolgt in Kapitel 2.3.1.

Die **galaktische kosmische Strahlung** (*galactic cosmic rays*, GCR) besteht aus hochener-
getischen geladenen Teilchen, vorwiegend aus Nukleonen (Protonen, α -Teilchen und schwereren
Kernen) und Elektronen. Mit Energien bis zu 10^{20} eV haben die Teilchen im Allgemeinen deutlich
höhere Energien als die der solaren Komponente. Dabei variiert die Intensität und fällt bei jenen
mit hoher Energie sehr schnell stark ab. So beträgt die Teilchenrate bei Energien höher 10^{19} eV
nur 1 Teilchen pro km^2 und Jahr ([34, 89]).

Das Energiespektrum der Nukleonen folgt näherungsweise einem Potenzgesetz ([89]):

$$J(\geq E) = J_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-q} \quad (2)$$

Die Energieverteilung macht bei 10^{15} eV einen leichten Knick. Bei dieser Übergangsregion, die
als "Knie" (*knee*) bezeichnet wird, beträgt der Exponent $q \simeq 1.7$, steigt danach auf $q \simeq 2.1$ und
flacht oberhalb von 10^{18} eV (dem "Knöchel") wieder ab (siehe dazu z.B. [89], [30] und [34]).

Die Quellen der galaktischen kosmischen Strahlung sind im Einzelfall kaum zu identifizieren,
da die geladenen Teilchen durch das Erdmagnetfeld und durch kosmische Magnetfelder abgelenkt
werden, wodurch ihre ursprüngliche Richtung kaum bestimmt werden kann. Es liegt aber nahe, ih-
ren Ursprung in der Wechselwirkung zwischen turbulenten Plasmen und Magnetfeldern zu suchen.

Ein solcher Prozess findet zum Beispiel bei Supernovae statt. Die Materie, die dabei ausgestoßen wird, kann mit dem interstellaren Medium wechselwirken und dabei Stoßwellen ausbilden. An deren Magnetfeldern können Protonen beziehungsweise andere geladene Teilchen reflektiert werden und dadurch Energie gewinnen (“Fermi-Mechanismus”). Bei Energien von mehr als 10^{15} eV ist der Ursprung der galaktischen kosmischen Strahlung noch unsicher, obwohl man auch hier einen Zusammenhang mit Stoßwellen in Supernovaüberresten vermutet [24]. Bei noch höheren Teilchenenergien von circa 10^{18} eV wird im Allgemeinen von einem extragalaktischen Ursprung ausgegangen.

Da sich geladene Teilchen in einem Magnetfeld entlang einer gekrümmten Bahn bewegen, kann durch Berechnung des entsprechenden Krümmungsradius abgeschätzt werden, ob es sich um galaktische oder extragalaktische Teilchen handelt. Der entsprechende Krümmungsradius (Lamor-Radius r_L) ist umso größer, je größer die Energie der Teilchen ist:

$$r_L = \frac{E}{ZeB} \quad (3)$$

Diese Formel lässt sich für hochenergetische Teilchen umformulieren ([49]):

$$r_L \sim 110 \text{kpc} Z^{-1} \left(\frac{\mu G}{B} \right) \left(\frac{E}{100 \text{EeV}} \right) \quad (4)$$

wobei Z die Ladungszahl des Teilchens ist, B die Feldstärke des Magnetfeldes und E die Energie des Teilchens. Für ein Proton ($Z=1$) im galaktischen Magnetfeld ($B = 1 \mu G$) ergibt sich bei einer Energie von $E=10^{18}$ eV ein Lamor-Radius von $r_L \sim 3600$ Lichtjahre. Bei einer Energie von 10^{20} eV steigt der Wert von r_L auf $3,6 \cdot 10^5$ Lichtjahre. Der erste Wert entspricht in der Größenordnung der Dicke der galaktischen Scheibe, der zweite Wert liegt in der selben Größenordnung wie die Ausdehnung der Milchstraße. Teilchen mit diesen Energien können von der Galaxis nicht oder kaum gehalten werden und müssen deswegen einen extragalaktischen Ursprung haben.

Die Quellen dieser extragalaktischen kosmischen Strahlung sind im Detail unbekannt, liegen aber mit großer Wahrscheinlichkeit in den aktiven Galaxienkernen, wo Materie durch die dort auftretenden relativistischen Jets beschleunigt werden, oder in den Stoßfronten, die beim Einfall von Materie in Galaxienhaufen entstehen können.

2.2 Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Die solare Komponente der kosmischen Strahlung entspricht im Wesentlichen der chemischen Zusammensetzung der Sonne selbst. Die galaktische kosmische Strahlung besteht zu etwa 87 % aus Protonen und zu ungefähr 12 % aus α -Teilchen [80]. Das restliche Prozent besteht aus den Kernen schwerer Atome. Die Häufigkeitsverteilung entspricht auch hier in etwa der solaren Häufigkeit, mit Ausnahme von Li, Be und B, die überrepräsentiert sind. Der Grund dafür ist die Spallation, also die Zertrümmerung von schweren Atomkernen aus der interstellaren Materie durch die hochenergetischen Protonen und Alphateilchen.

Die durch die Erdatmosphäre unbeeinflusste kosmische Strahlung wird *primäre* kosmische Strahlung genannt. Die auf der Erde detektierbare kosmische Strahlung unterscheidet sich von der im Weltall, da auch hier Spallationsreaktionen mit den Atomen der Atmosphäre die Häufigkeitsverteilung verändern. Wenn ein Teilchen der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft, werden dort Teilchenschauer ausgelöst. Die Spallation von Stickstoff- und Sauerstoffatomen erzeugt Neutronen, Protonen und Pionen (sowohl geladen als auch ungeladen). Die neutralen Pionen zerfallen zuerst in Myonen und Neutrinos; die Myonen zerfallen weiter in Elektronen, Positronen und

Neutrinos. Die primäre kosmische Strahlung erfährt in der Atmosphäre durch die Wechselwirkungen mit den Atomkernen in der Luft eine wesentliche Transformation bei der Sekundärteilchen (am häufigsten Pionen) erzeugt werden. Man nennt dies daher die *sekundäre* kosmische Strahlung [34].

2.3 Solare Modulation der galaktischen kosmischen Strahlung

2.3.1 Sonnenaktivität

Der Begriff „Sonnenaktivität“ bezeichnet die veränderlichen Phänomene der Sonne, die aus der Dynamik des heißen Plasmas und dessen Wechselwirkung mit dem solaren Magnetfeld entstehen. Eine umfassende Darstellung dieses Themas ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, weswegen sich dieser Abschnitt vor allem auf die Grundlagen und den Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und der Sonnenaktivität konzentriert. Es gibt mehrere Indikatoren für die Sonnenaktivität. Der direkteste Weg liegt in der Beobachtung der Sonnenflecken. Dabei handelt es sich um Bereiche in der sichtbaren Sonnenoberfläche, die rund 1500 Grad kühler als die Umgebung sind. Während die mittlere Oberflächentemperatur der Sonne bei circa 5770 K liegt, beträgt die Temperatur im Kernbereich eines Sonnenflecks durchschnittlich nur etwa 4270 K. Die dadurch verringerte Strahlungsintensität lässt die Sonnenflecken als dunkle Bereiche erscheinen. Ein Sonnenfleck markiert die Region, in der ein Magnetfeldbogen durch die Photosphäre austritt. Das dort stärkere Magnetfeld hemmt die Konvektion von heißem Plasma aus den tieferen Schichten der Sonne, was zu einer lokalen Abkühlung führt.

Die Entstehung und die Anzahl der Sonnenflecken zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt direkt mit den Aktivitätszyklen der Sonne zusammen. Die Sonne rotiert nicht als Festkörper sondern differentiell. Äquatoriale Regionen haben eine Umlaufperiode von etwa 25 Tagen, polnahe Regionen rotieren mit etwa 30 Tagen deutlich langsamer. Dieses Phänomen führt zu einer Störung des Magnetfeldes, da die Feldlinien dem ionisierten Plasma folgen. Ein ursprünglich bipolares Magnetfeld in Nord-Südausrichtung wird so immer weiter verzerrt und es können sich vermehrt der Feldbögen ausbilden, die Sonnenflecken verursachen. Je größer die Störung des Magnetfeldes wird, desto mehr Flecken können entstehen. Sie bewegen sich in Richtung des Äquators und können sich dort gegenseitig neutralisieren, wodurch sich ein neues bipolares solares Magnetfeld bilden kann. Dieser Zyklus dauert im Mittel etwa 11 Jahre („Schwabe-Zyklus“). In Zeiten hoher Aktivität können sich die verzerrten Magnetfeldbögen berühren und neu verbinden. Bei dieser „Rekonnexion“ werden große Energiemengen frei, was als „Flare“, also als kurzer lokaler Anstieg hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung (Röntgen- und Gammastrahlung) beobachtet werden kann. Bei einer Rekonnexion kann auch Material aus dem solaren Plasma hinaus ins All geschleudert werden, was als „koronaler Massenauswurf“ (*Coronal Mass Ejection*, *CME*) bezeichnet wird.

Der 11-jährige Schwabe-Zyklus ist seit dem 19. Jahrhundert bekannt, weist aber keine exakte Periodizität auf. Das Ausmaß der Sonnenaktivität an den jeweiligen Maxima ist ebenfalls nicht immer gleich groß. Aktuell (Juni 2026) befindet sich die Sonne im 25. Zyklus, der im Jahr 2019 begonnen hat ¹. Das Maximum der Aktivität in diesem Zyklus wurde im Oktober 2024 erreicht [90], das Ende wird im Jahr 2030 erwartet. Neben dem 11-jährigen Hauptzyklus verändert sich die Aktivität der Sonne auch noch mit längeren Perioden, zum Beispiel dem 22-jährigen Hale-Zyklus, dem Gleißberg-Zyklus, der eine Periode von etwa 90 Jahren hat oder dem 200-jährigen Suess-de

¹Die Zählung der Zyklen beginnt im Jahr 1760

Vries-Zyklus [83].

Neben der Zählung von Sonnenflecken lässt sich die Aktivität auch durch die Intensität der Radiostrahlung bei 10.7cm bestimmen, die durch frei-frei Übergänge von freien Elektronen an positiv geladene Ionen in der Chromosphäre und der unteren Korona entsteht [35] (für weitere Methoden der Bestimmung der Sonnenaktivität siehe [53]).

2.3.2 Heliosphärisches Magnetfeld und Forbush-Effekt

Der magnetische Einfluss der Sonne reicht weit in das Planetensystem und darüber hinaus. Die geladenen Teilchen des Sonnenwinds führen das Magnetfeld der Sonne mit sich, wodurch das interstellare Medium aus der Umgebung des Sonnensystems verdrängt wird. Der Bereich, in dem der Sonnenwind auf diese Weise den Einfluss der interstellaren Materie dominiert, wird als „Heliosphäre“ bezeichnet. Der Einfluss des Sonnenwinds endet an der „Heliopause“. Dort vermischen sich Sonnenwind und interstellares Gas, so dass es keine dominante Strömungsrichtung mehr gibt. Noch vor der Heliopause sinkt die Geschwindigkeit des Sonnenwinds unter die Schallgeschwindigkeit im Sonnensystem. Beim Übergang von Über- zu Unterschallgeschwindigkeit bildet sich eine Stoßwelle, der sogenannte „Termination Shock“. Der Sonnenwind wird stark abgebremst und seine Geschwindigkeit sinkt von etwa 400 km/s auf circa 150 km/s [67]. Der nachströmende, schnellere Sonnenwind führt zu einer lokalen Verdichtung und einem Anstieg der Magnetfeldstärke. Das Ausmaß der Heliosphäre ist nicht konstant, sondern variiert einerseits durch die jeweilige Stärke des Sonnenwinds (also der Sonnenaktivität) und wird andererseits durch die Bewegung des Sonnensystems durch die Milchstraße verformt. Die Heliosphäre sorgt dafür, dass nur etwa 10 % der gesamten galaktischen kosmischen Strahlung ins innere Sonnensystem gelangen kann [65].

In Zeiten besonders starker Sonnenaktivität kann sich dieser Prozentsatz noch weiter verringern, wie der amerikanische Geophysiker Scott Forbush 1937 beobachtete [26]. Wenn eine Sonneneruption einen koronalen Massenauswurf verursacht, dann kann das nicht nur zu Störungen im Magnetfeld der Erde führen, sondern auch zu einer Verringerung der Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung. Das magnetische Feld des ausgeworfenen solaren Plasmas kann die Teilchen der kosmischen Strahlung aus der Umgebung der Erde entfernen und mit sich reißen. Das nach ihrem Entdecker benannte „Forbush-Ereignis“, tritt typischerweise ein paar Tage nach einem koronalen Massenauswurf auf und dauert ein paar Stunden an. Die auf der Erde messbare Rate an Teilchen der galaktischen kosmischen Strahlung verringert sich dabei um einige Prozent, in starken Fällen zwischen 10 und 20 %. Die darauf folgende Normalisierung kann Tage oder Wochen dauern [7]. Abbildung 1 zeigt das schnelle Absinken der Intensität bei einem Forbush-Ereignis an einem Beispiel im Februar 2011.

Das Ausmaß der Minderung der Strahlungsintensität hängt davon ab, wie energiereich der koronale Massenauswurf war, wie stark das Magnetfeld des Plasmas ist und wie dicht sich dieses ausgeworfene Plasma an der Erde vorbei bewegt. Forbush-Ereignisse wurden bisher nicht nur auf der Erde gemessen, sondern auch mit Messinstrumenten auf der Internationalen Raumstation, dem Mars Science Laboratory und von den Raumsonden Pioneer 10 und 11 und Voyager 1 und 2.

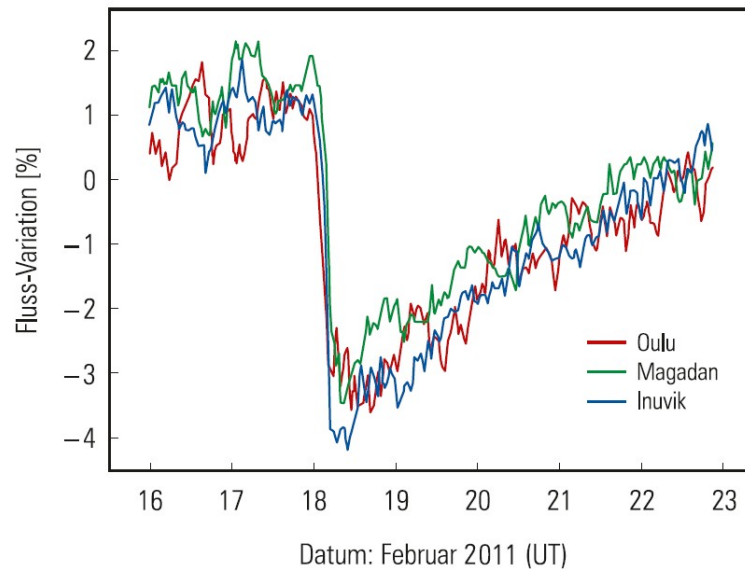


Abbildung 1: Der Forbush-Effekt zeigt den deutlichen Abfall der kosmischen Strahlung nach einem Flare; gemessen an unterschiedlichen Messtationen auf der Erde (Grafik aus [34]).

2.4 Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität, kosmische Strahlung und Klima

Der direkte Einfluss der Sonnenaktivität auf die Temperatur der Erde ist minimal. Die Stärke der Sonnenstrahlung fluktuiert während des 11-jährigen Aktivitätszyklus nur um etwa 0.1 % [58]. Sonnenflecken sind zwar kühler als der Rest der Sonnenoberfläche, dieser Effekt wird durch den Anstieg der Strahlung in den Flare-Regionen ausgeglichen beziehungsweise überkompensiert [36]. Historische Rekonstruktionen der Sonnenaktivität zeigen Phasen, in denen die Sonne für längere Zeit kaum oder nur schwach aktiv war. Ende des 19. Jahrhunderts wurde bei der Analyse von historischen Sonnenfleckenzahlen zum Beispiel entdeckt, dass es zwischen 1645 und 1715 kaum Aktivität gab. Diese Phase wurde „Maunder-Minimum“ genannt und hat zu Spekulationen geführt, dass diese langfristige Verringerung der Sonnenaktivität auch für die „Kleine Eiszeit“ verantwortlich gewesen sein könnte, als zwischen Ende des 16. Jahrhunderts und bis über die Mitte des 17. Jahrhunderts hinaus die globale Temperatur unter dem langjährigen Mittelwert lag. Neuere Forschung, etwa von Owens [62], konnte aber zeigen, dass das Maunder Minimum zwar während der Kleinen Eiszeit stattgefunden hat, es aber keinen Nachweis eines kausalen Zusammenhangs gibt, sondern dass andere Faktoren, wie zum Beispiel vulkanische Aktivitäten, für die Kleine Eiszeit verantwortlich waren.

Ein indirekter Einfluss der kosmischen Strahlung auf das Klima der Erde wurde schon 1959 von Edward Ney vermutet [60]. Er bezog sich dabei auf die Beobachtungen durch Forbush: Ein Anstieg der Sonnenaktivität führt zu einer Verringerung der kosmischen Strahlung auf der Erde. Dadurch werden auch weniger Atome in der Erdatmosphäre ionisiert, was, so die Vermutung von Ney, wegen

der verringerten Leitfähigkeit der Atmosphäre zu einem vermehrten Auftreten von Stürmen führen könnte. Dadurch würde es auch mehr Wolken geben und die Temperatur würde sinken. Ney wies darauf hin, dass es sich dabei um eine Hypothese handelt, die als Beispiel für einen möglichen Zusammenhang zwischen Klima und kosmischer Strahlung dienen könnte. Robert Dickinson verfolgte diese Idee 1975 weiter [17]. Auch er ging von einem Zusammenhang der atmosphärischen Ionisation und kosmischer Strahlung aus. Die Ionisierung würde die Bildung von Schwefelsäure-Aerosolen erleichtern, die als Kerne für die Bildung von Wolken dienen. Das Ausmaß der Bedeckung durch Wolken hat wiederum Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde und damit auf das Klima. So wie Ney wies auch Dickinson darauf hin, dass es sich um eine Spekulation handelt und das Ausmaß des Effekts unbekannt ist.

Der dänische Physiker Henrik Svensmark behauptete in einer Arbeit aus dem Jahr 1998, dass die Temperatur der Erde den Variationen der galaktischen kosmischen Strahlung viel signifikanter folgen würde als bisher angenommen [84]. Die Auswirkung der kosmischen Strahlung auf die Anzahl der Aerosole, die als Kondensationskeime für die Wolkenbildung dienen können, wäre nicht vernachlässigbar. Das Ausmaß der Sonnenaktivität würde die Stärke der auf der Erde eintreffenden galaktischen kosmischen Strahlung modulieren und, über die Veränderungen in der Wolkenbildung, auch das Klima der Erde. Eine genaue Analyse dieser Arbeit und des darin beschriebenen Effekts erfolgt im folgenden Kapitel 3.

3 Die GCR-Wolken-Hypothese

Die Erforschung des Klimawandels und seiner Ursachen zählt zu den zentralen Fragestellungen der modernen Atmosphären- und Klimaforschung. Seit Beginn systematischer Temperaturmessungen wird ein langfristiger Anstieg der globalen Mitteltemperatur beobachtet, dessen Verstärkung insbesondere seit Beginn der Industrialisierung deutlich erkennbar ist. Abbildung 2 zeigt den Anstieg der mittleren globalen Temperatur in einem Zeitraum von 1850 – 2020. Besonders deutlich ist der kontinuierliche Anstieg seit den 1980er Jahren zu sehen.

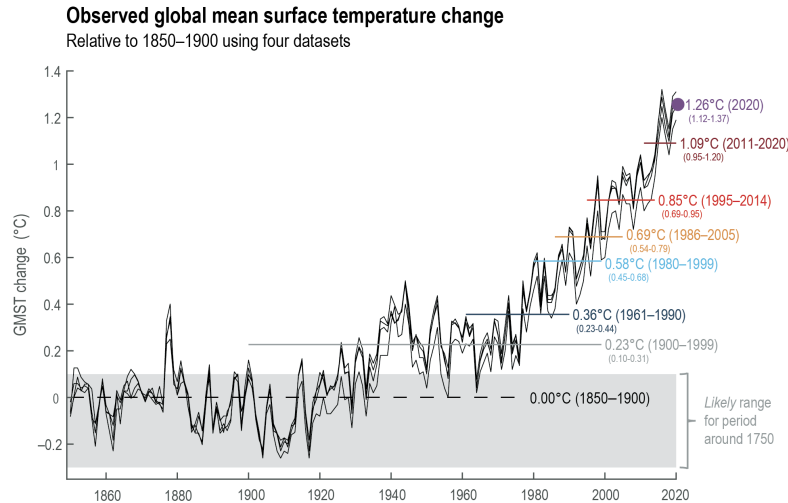


Abbildung 2: Beobachtete globale mittlere Oberflächentemperatur (GMST) aus vier Datensätzen, jeweils relativ zur Durchschnittstemperatur des Zeitraums 1850–1900 (aus [40])

Die physikalische Grundlage klimatischer Änderungen bildet die Strahlungsbilanz der Erde. Das Klima wird im Wesentlichen durch das Gleichgewicht zwischen eingehender Sonnenstrahlung und ausgehender terrestrischer Strahlung bestimmt. Die Solarkonstante beträgt näherungsweise $S \approx 1366 \text{ W m}^{-2}$, wobei dieser Wert aufgrund der Kugelgeometrie der Erde auf die gesamte Erdoberfläche gemittelt werden muss. Dadurch ergibt sich eine globale mittlere einfallende Strahlungsleistung von

$$S \approx 1366 \text{ W m}^{-2}.$$

Verschiedene Prozesse können dieses Strahlungsgleichgewicht beeinflussen und Änderungen des Klimas hervorrufen. Solche Einflüsse werden üblicherweise durch den Begriff des Strahlungsantriebs (*Radiative Forcing*) beschrieben. Ein positiver Strahlungsantrieb führt zu einer Erwärmung des Klimasystems, während ein negativer Strahlungsantrieb eine Abkühlung bewirkt.

Im Rahmen der Klimaforschung werden sowohl anthropogene als auch natürliche Ursachen betrachtet. Zu den wichtigsten anthropogenen Einflüssen zählen insbesondere Treibhausgase wie Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4 und Distickstoffoxid N_2O . Seit Beginn der industriellen Revolution ist die atmosphärische Konzentration von Kohlenstoffdioxid deutlich angestiegen. Frühe

Abschätzungen gingen von einer Zunahme um ungefähr 30 % gegenüber vorindustriellen Werten aus [8]. Die daraus resultierende Verstärkung des Treibhauseffekts führt zu einem positiven Strahlungsantrieb. Der sechste Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2021 ([40], Figure 7.6) gibt einen anthropogener Netto-Strahlungsantrieb von

$$\Delta F \approx 2,72 \text{ W m}^{-2}$$

an.

Neben anthropogenen Ursachen werden auch natürliche Einflüsse untersucht. Aufgrund ihrer Rolle als primäre Energiequelle des Klimasystems besitzt die Sonne dabei eine besondere Bedeutung. Änderungen der Sonnenaktivität, beispielsweise Veränderungen der Sonnenfleckenzahl, der ultravioletten Strahlung oder längerfristige Variationen solarer Aktivitätszyklen, wurden intensiv untersucht. Zahlreiche Arbeiten zeigten, dass die Sonnenaktivität im Verlauf des 20. Jahrhunderts zeitweise ungewöhnlich hoch war und verschiedene Klimaparameter Korrelationen mit Indikatoren solarer Aktivität aufweisen (siehe zum Beispiel [88]). Da, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, ein direkter Einfluss der Sonnenaktivität auf die Temperatur der Erde aber nur gering ist, stellte sich die Frage, ob indirekte Verstärkungsmechanismen existieren. Ein Kandidat dafür ist die Modulation der galaktischen kosmischen Strahlung durch die Sonnenaktivität. Wie im Kapitel 2.3.1 beschrieben, führt eine erhöhte Sonnenaktivität zu einer stärkeren Abschirmung galaktischer kosmischer Strahlung durch den Sonnenwind und das heliosphärische Magnetfeld, wodurch die Intensität der GCR in Erdnähe abnimmt. Obwohl diese antikorrelierten Änderungen der kosmischen Strahlung seit langer Zeit bekannt waren, blieb ihre mögliche Bedeutung für atmosphärische Prozesse und klimatische Auswirkungen zunächst weitgehend ungeklärt. Erst die Arbeiten von Svensmark und Friis-Christensen in den späten 1990er Jahren führten zu der Hypothese, dass Änderungen der galaktischen kosmischen Strahlung indirekt über Prozesse der Wolkenbildung die Strahlungsbilanz der Erde und damit das Klima beeinflussen könnten.

3.1 Die Arbeiten von Svensmark et al.

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Fragen standen im Zentrum der 1997 erschienen Arbeit „Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships“ von Svensmark und Friis-Christensen [87], sowie ein Jahr später in dem Paper von Svensmark, in der er die Cosmic-Ray-Cloud-Hypothese (GCR-Wolken-Hypothese) in „Influence of Cosmic Rays on Earth’s Climate“ weiter ausbaute [84].

Die grundlegende Annahme dieser Arbeiten bestand darin, dass Änderungen der Sonnenaktivität, insbesondere Variationen in der Länge der Sonnenzyklen, indirekt über die Modulation der galaktischen kosmischen Strahlung (*GCR*) die Wolkenbildung beeinflussen können. Wolken entstehen, wenn feuchte Luft den Sättigungszustand erreicht und Wasserdampf an mikroskopisch kleinen Aerosolpartikeln kondensiert beziehungsweise bei tiefen Temperaturen resublimiert. Diese Aerosolpartikel fungieren als Kondensationskerne beziehungsweise Eiskeime. Ohne solche Partikel wäre die Bildung von Wolkentröpfchen unter atmosphärischen Bedingungen stark erschwert. Kondensationskerne (*Cloud Condensation Nuclei*, *CCN*) bestehen aus festen oder flüssigen Aerosolpartikeln mit typischen Größen im Nano- bis Mikrometerbereich. Für die Wolkenbildung ist insbesondere ihre hygroskopische Eigenschaft entscheidend, also die Fähigkeit, Wassermoleküle anzulagern. Dadurch kann Wasserdampf bereits bei einer relativen Luftfeuchtigkeit unterhalb von 100 % kondensieren. Zu den wichtigsten Bestandteilen von Kondensationskernen zählen Meersalzpartikel, die durch Wind

und Gischt in die Atmosphäre gelangen, mineralische Staubpartikel wie Wüstenstaub oder Vulkanasche, Sulfat- und Nitratpartikel aus industriellen und anthropogenen Emissionen, Rußpartikel aus Verbrennungsprozessen sowie organische Aerosole biologischen Ursprungs, beispielsweise Pollen oder Pilzsporen. Darüber hinaus können auch flüssige Aerosole, etwa Schwefelsäuretröpfchen, als Kondensationskerne wirken.

Galaktische kosmische Strahlung kann die Wolkenbildung indirekt beeinflussen, wenn sie die Atome und Moleküle in der Atmosphäre ionisiert. Diese Ionen können zur Entstehung von Molekülclustern beitragen, die sich zum Beispiel aus Wasser, Schwefelsäure und organischen Verbindungen bilden. Diese Cluster können die Grundlage von Kondensationskernen werden, wenn sie ausreichend schnell anwachsen. Dieser Prozess der ioneninduzierten Nukleation bildet die Grundlage für die GCR-Wolken-Hypothese. Eine Änderung der Wolkenbedeckung würde unmittelbar die Strahlungsbilanz der Erde beeinflussen, da Wolken einen wesentlichen Beitrag zur planetaren Albedo leisten. Svensmark bezog sich in seinen Arbeiten auf Satellitendaten, die eine Korrelation zwischen Wolkenbedeckung und der Variation der Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung während eines Sonnenzyklus nahelegen. Svensmark und Friis-Christensen diskutierten mehrere mögliche Wirkungswege. Zum einen könnten Ionen die Bildung neuer Kondensationskeime begünstigen. Zum anderen könnten elektrische Ladungen die Eigenschaften vorhandener Aerosole und Wolkentröpfchen verändern und dadurch Kondensationsprozesse beeinflussen. Darüber hinaus verwiesen sie insbesondere auf die Arbeit von Dickinson [17]) aus dem Jahr 1975, die einen Zusammenhang zwischen der Ionisierung durch kosmischer Strahlung und der Wolkenbildung nahelegte. Eine erhöhte Anzahl von Wolkenkondensationskernen könnte die mikrophysikalischen Eigenschaften von Wolken verändern und dadurch deren räumliche Ausdehnung, optische Dicke oder Lebensdauer beeinflussen. Insbesondere eine Zunahme tiefer Wolken würde zu einer stärkeren Reflexion kurzwelliger Sonnenstrahlung und damit zu einem kühlenden Effekt führen.

Beide Arbeiten [87],[84]) basierten primär auf Korrelationsanalysen zwischen verschiedenen klimatologischen und solaren Zeitreihen. Zur Reduktion saisonaler und kurzfristiger Schwankungen verwendeten die Autoren gleitende 12-Monats-Mittelwerte. Als Indikatoren der Sonnenaktivität und der kosmischen Strahlung wurden unter anderem die Sonnenfleckenzahlen, der solare Radiofluss bei 10.7 cm und Neutronenmonitor-Daten verschiedener Messstationen verwendet. Zur Untersuchung der Wolkenbedeckung wurden verschiedene Satellitendatensätze, darunter Daten des International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), des Nimbus-7-Projektes sowie DMSP-Messungen verwendet.

Die Autoren berichteten zunächst über eine starke Korrelation zwischen globaler Wolkenbedeckung und der Intensität galaktischer kosmischer Strahlung. Für geglättete Datensätze ergaben sich Korrelationskoeffizienten von ungefähr $r \approx 0.95 - 0.97$ zwischen Wolkenbedeckung und GCR-Intensität [87]. Zusätzlich beobachteten sie Änderungen der globalen Wolkenbedeckung von etwa $3 - 4\%$ über einen Sonnenzyklus.

Darüber hinaus zeigte sich eine deutliche Breitenabhängigkeit: Der Effekt war in Äquatornähe schwächer ausgeprägt und nahm zu höheren Breiten hin zu, was als eine Folge der stärkeren geomagnetischen Abschirmung kosmischer Strahlung im Bereich des Äquators interpretiert wurde. Zudem argumentierten die Autoren, dass langfristige Temperaturänderungen besser mit Variationen der GCR korrelieren als mit anderen betrachteten Parametern der Sonnenaktivität. Die beobachtete Temperaturzunahme von ungefähr

$$\Delta T \approx 0.3^\circ\text{C}$$

im Zeitraum von 1970 bis 1990 könne nach ihrer Interpretation weitestgehend durch ein aus Wolkenänderungen resultierendes Strahlungsforcing erklärt werden [84]. Unter der Annahme ei-

nes kausalen Zusammenhangs schätzt Svensmark für den Zeitraum 1975–1989 einen zusätzlichen Strahlungsantrieb von ungefähr

$$\Delta F \approx 0.5 \text{ W m}^{-2}$$

der durch Veränderung der GCR-Intensität von 1,2% hervorgerufen wurde [84]. Svensmark merkte an, dass das circa das Vierfache dessen ist, was von den Änderungen der Sonneneinstrahlung zu erwarten wäre, betonte jedoch zugleich ausdrücklich, dass der genaue mikrophysikalische Mechanismus noch nicht bekannt war [84]:

”There is at present no detailed understanding of the microphysical mechanism that connects solar activity and Earth’s cloud cover.”

4 Entstehung eines Konsens zur GCR-Wolken-Hypothese

Um einschätzen zu können, wie sich die GCR-Wolken-Hypothese seit der ersten Publikation auf die wissenschaftliche Diskussion ausgewirkt hat, und wann ein Konsens dazu erreicht wurde, soll in diesem Kapitel im ersten Schritt eine Analyse der auf Svensmarks Arbeit folgende Publikationsstätigkeit erstellt werden. Danach erfolgt eine Betrachtung des CLOUD-Experiment am CERN, das sich der experimentellen Überprüfung der Hypothese widmete. Abschließend wird der aktuelle wissenschaftliche Stand anhand der Sachstandsberichte des IPCC dargestellt.

4.1 Literaturanalyse

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie sich die GCR-Wolken-Hypothese auf die wissenschaftlichen Diskussion ausgewirkt hat. In der Arbeit von Svensmark und Friis-Christensen [87] wird vor allem der Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und der Wolkenbildung untersucht und eine Auswirkung auf das Klima nur angedeutet. In der 1998 erschienen Arbeit von Svensmark [84] wird hingegen die kosmische Strahlung mit Temperaturveränderungen auf der Erde verknüpft und eindeutig festgestellt:

“Further it is found that Earth’s temperature follows more closely decade variations in galactic cosmic ray flux and solar cycle length (...). The main conclusion is that the average state of the heliosphere affects Earth’s climate”.

In der späteren Arbeit wurden Daten verwendet, die den Zeitraum zwischen 1937 und 1996 umfassen, während in der ersten Arbeit ein wesentlich kürzerer Datensatz (1980-1995) verwendet wurde. Um die Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf das Erdklima zu untersuchen, ist [84] die relevantere Arbeit. Die folgende Literaturanalyse bezieht sich daher auf Zitierungen dazu.

In der ADS-Literaturdatenbank [74] werden (mit Stand Juni 2026) 240 Zitierungen aufgelistet. Die meisten Arbeiten (194), die [84] zitieren, sind in referierten Journals erschienen, 46 weitere Erwähnungen gab es in nicht referierten Publikationen. Die Verteilung der Zitate im Laufe der Zeit ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei fällt als erstes auf, dass die meisten Erwähnungen im Jahr 2000 stattfanden. Berücksichtigt man das genaue Publikationsdatum von [84] (30. November 1998) und die Zeit, die für das Verfassen und Publizieren einer wissenschaftlichen Arbeit nötig ist, dann ist es nicht überraschend, dass die erste große Reaktion erst im Jahr 2000 stattfand. Im selben Jahr fand auch die Euroconference SOLSPA (Solar and Space Weather Euroconferences) statt, die explizit den Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und Erdklima zum Thema hatte und deren Proceedings die überdurchschnittlich hohe Anzahl an Zitaten aus nicht-referierten Journalen im Jahr 2000 erklären [92].

Auffallend ist auch der starke Abfall der Zitate ab dem Jahr 2014. Mögliche Gründe dafür werden in den Abschnitten 4.2 und 4.1.2 behandelt.

4.1.1 Methodik

Für eine detaillierte Analyse der Auswirkungen von [84] wurden in der Folge nur die Zitate aus referierten Journalen berücksichtigt. Bei jeder dieser 194 Arbeiten wurde untersucht, auf welche Weise die GCR-Wolken-Hypothese erwähnt wurde. Eine ausführliche Übersicht über die Ergebnisse findet sich in Anhang A. Dort sind alle 194 Arbeiten aufgelistet, zusammen mit Angaben darüber, wie die GCR-Wolken-Hypothese bewertet wurde und einem relevanten Zitat aus der Arbeit. Die Bewertung erfolgte dabei nach folgenden Maßstäben:

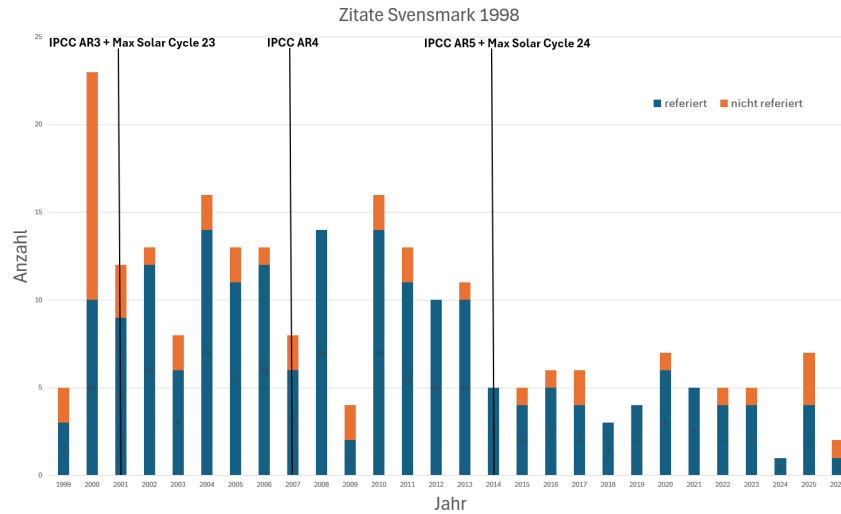


Abbildung 3: Gesamt-Zitierungen von Svensmark (1998) im Zeitraum 1998-2026 in der ADS-Datenbank

- Positiv: Die GCR-Wolken-Hypothese wird bestätigt oder als gültig vorausgesetzt bzw. erwähnt
- Negativ: Die GCR-Wolken-Hypothese wird nicht bestätigt oder als ungültig bezeichnet
- Neutral: Die GCR-Wolken-Hypothese wird erwähnt, ohne sie zu bewerten beziehungsweise es wird dabei auf ihren noch nicht belegten Zustand verwiesen
- Positiv-Neutral: Die GCR-Wolken-Hypothese wird tendenziell unterstützt, aber es wird auf ihren unsicheren Status hingewiesen
- Negativ-Neutral: Die GCR-Wolken-Hypothese wird tendenziell abgelehnt, aber es wird auf ihren unsicheren Status hingewiesen
- Irrelevant: Die Arbeit beschäftigt sich mit einem Thema, das für die Beurteilung der GCR-Wolken-Hypothese nicht relevant ist

Ein Beispiel für eine Arbeit, die als „Positiv“ klassifiziert wurde, ist [19], in der folgendes festgestellt wird: „From our results and Fig. 4, it follows that the global influence of long-term CR intensity variation on the planetary climate is comparable with expected global warming caused by increasing of green gases, and may be several times bigger than direct influence of solar irradiation’s solar cycle variation“.

Ein Beispiel für die Kategorie „Positiv-Neutral“ ist [15] mit der Aussage „Nevertheless, although there is a strictly substantiated correlation between the galactic cosmic rays, modulated by the solar and geomagnetic fields, and climate over different time scales, further research need be carried out to prove a physical relationship among the galactic cosmic rays, the solar and terrestrial fields, and the orbital movements of the Earth.“

Eindeutig als „Negativ“ klassifiziert werden können Arbeiten wie [75]: „For a demonstrable effect of galactic cosmic rays on climate, it would be necessary that the cosmic ray flux exhibit a clear and significant long-term downward trend. Such a trend, however, is not seen.“

Ein Beispiel für die Kategorie „Negativ-Neutral“ ist [51] mit der Aussage: „A cosmic ray modulation seems less likely, but can not be ruled out on the basis of the present analysis.“

Als rein „Neutral“ können arbeiten wie [13] klassifiziert werden: „Clearly, the assumed cosmic ray-cloud connection is not yet satisfactorily solved.“

In die Kategorie „Irrelevant“ fallen Arbeiten, die Svensmarks Hypothese nur am Rande erwähnen oder aber in einem Zusammenhang, der nicht für den Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und dem irdischen Klima relevant sind. Beispiele dafür sind etwa [64], in der es um Turbulenzen in Gas- und Staubscheiben um andere Sterne geht oder [61], die sich mit der Fischwirtschaft in der Nordsee beschäftigen. Oft wird Svensmarks These auch nur in der Einleitung zu Arbeiten erwähnt, die sich nicht mit dem aktuellen Klimawandel beschäftigen, sondern Phänomene auf anderen Zeitskalen betrachten. Beispiele dafür sind [77], in der das „Faint Sun paradox“ untersucht wird, oder [14], in der es um einen Zusammenhang zwischen galaktischer Dynamik und Eiszeiten geht. In die Kategorie „Irrelevant“ wurden auch zwei Arbeiten einsortiert, deren Publikation zurückgezogen wurde, eine Arbeit die doppelt in ADS gelistet war und andere nicht passende Publikationsformen (zum Beispiel eine Dissertation [76]).

4.1.2 Resultate der Literaturanalyse

Von den 194 referierten Arbeiten, die [84] bis Ende Juni 2026 zitiert haben, wurden 19 als „Negativ“ klassifiziert und 12 als „Negativ-Neutral“. 24 Arbeiten wurden als „Positiv“ klassifiziert, 28 fielen in die Kategorie „Positiv-Neutral“. Als ausschließlich „Neutral“ wurden 28 Arbeiten eingestuft, während 83 Arbeiten als „Irrelevant“ klassifiziert wurden. Fasst man die Kategorien „Negativ“ und „Negativ-Neutral“ sowie „Positiv“ und „Positiv-Neutral“ jeweils zusammen, ergibt sich die in Tabelle 4.1.2 dargestellte prozentuale Verteilung.

Kategorie	Anteil [%]
Irrelevant	43
Positiv gesamt	27
Negativ gesamt	16
Neutral	14

Tabelle 1: Anteile der Bewertungen der Literaturanalyse in Prozent.

Zuerst fällt hier auf, dass die irrelevanten Arbeiten mit fast der Hälfte der Zitate den größten Anteil ausmachen. Das liegt daran, dass [84] oft nur in der Einleitung erwähnt wird, um auf Faktoren hinzuweisen, die möglicherweise einen Einfluss auf das Erdklima haben beziehungsweise die Bedeutung der Erforschung der Sonnenaktivität zu betonen, während die eigentliche Arbeit sich mit einem anderen Themen beschäftigt. Oft wird [84] auch zitiert, um andere alternative Hypothesen zum Klimawandel einzuleiten, wie zum Beispiel in den Arbeiten von Scafetta ([68, 69, 70, 72, 71]). Über den gesamten Beobachtungszeitraum überwiegen die positiven Erwähnungen, woraus aber kein Beleg oder wissenschaftlicher Konsens für die GCR-Wolken-Hypothese abgeleitet werden kann. Die ersten kritischen Artikel erschienen ebenfalls schon früh. Aus wissenschaftstheoretischer Sicht ist es auch nicht notwendig, die Widerlegung einer Hypothese immer wieder zu veröffentlichen.

Wesentlich deutlicher lässt sich die Entwicklung eines wissenschaftlichen Konsens in Abbildung 4 verfolgen.

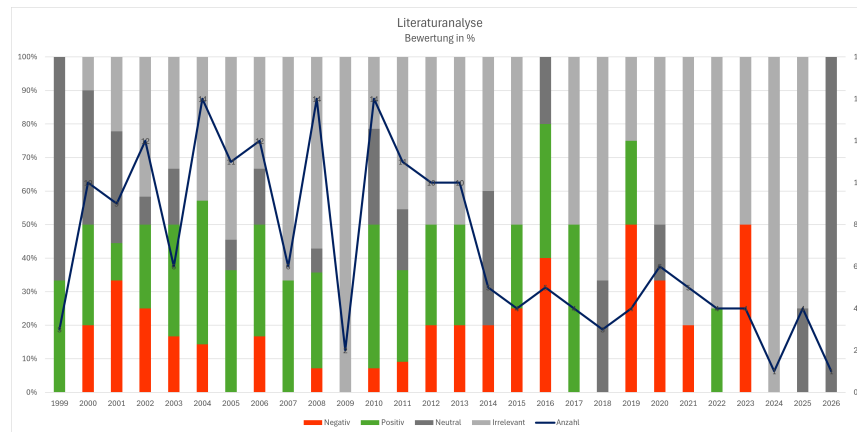


Abbildung 4: Übersicht der Bewertungen im Gesamtbetrachtungszeitraum von 1998-2026 in Prozent. Die blaue Linie zeigt die Anzahl der Publikationen.

Hier ist der relative Anteil der Publikationen aus den vier Kategorien (Negativ/Negativ-Neutral, Positiv/Positiv-Neutral, Neutral, Irrelevant) pro Jahr über den gesamten Beobachtungszeitraum dargestellt. Direkt nach der Publikation von [84] gab es vergleichsweise viele neutrale und positive Referenzen. Die Anzahl der irrelevanten Erwähnungen war die gesamte Zeit über hoch. Das Bild änderte sich erst ab dem Jahr 2018, wo positive Erwähnungen fast verschwanden. Ein genauerer Blick in die Daten aus Tabelle A im Anhang zeigt aber, dass die GCR-Wolken-Hypothese schon ab dem Jahr 2014 keine Unterstützung mehr in der wissenschaftlichen Literatur fand. Von 2014 bis 2026 gab es insgesamt nur mehr 7 positive bzw. positiv-neutrale Erwähnungen. Drei davon stammen aus Arbeiten, an denen Svensmark selbst mitgearbeitet hat ([39, 86, 85]). Zwei Arbeiten, welche die Svensmarks Hypothese nach 2014 positiv erwähnen, stammen von Nicola Scafetta ([70, 72]) und je eine von Jean-Louis Le Mouél et al [55] und Horst-Joachim Lüdecke und Carl-Otto Weiss [56]. Alle genannten Personen haben sich öffentlich zum Klimawandel geäußert und einen anthropogenen Ursprung verleugnet. Scafetta und Weiss waren unter anderem Redner auf Konferenzen von EIKE (Europäisches Institut für Klima und Energie), einem eingetragenen Verein, der den wissenschaftlichen Konsens zum anthropogenen Klimawandel leugnet; Lüdecke war der Pressesprecher von EIKE ([91, 23, 16]). Es ist nicht weiter überraschend, dass Svensmarks Hypothese von Leugnern des menschengemachten Klimawandels auch weiterhin aufgegriffen und positiv erwähnt wurden, selbst als sich der wissenschaftliche Konsens zu diesem Zeitpunkt eine gegenteilige Meinung gebildet hatte. Lässt man diese Referenzierungen beiseite, ergibt sich ein Bild, das auch mit der Anzahl der Referenzen insgesamt in Abbildung 3 übereinstimmt: Ab dem Jahr 2014 sank nicht nur die Anzahl der gesamten Zitate; die dann noch publizierten Arbeiten erwähnten Svensmarks Hypothese außerdem vorrangig negativ bzw. sind neutral oder irrelevant.

4.2 Entwicklung eines wissenschaftlichen Konsens

Die Auseinandersetzung mit der GCR-Wolken-Hypothese begann direkt nach ihrer erstmaligen Veröffentlichung. Wie die Analyse der Literatur im letzten Abschnitt gezeigt hat, wurde sie weder sofort abgelehnt, noch vorbehaltlos akzeptiert. Der prinzipiell plausible, wenn auch im Detail damals unbekannte Mechanismus durch den die galaktische kosmische Strahlung die Wolkenbildung und damit die Temperatur der Erde moduliert, wurde wissenschaftlich seriös rezipiert und geprüft. Dabei waren drei Strategien von besonderer Bedeutung. Erstens wurde überprüft, ob der Zusammenhang, der in [87] und [84] postuliert wurde, auch dann noch bestehen bleibt, wenn die Datengrundlage erweitert und verfeinert wird. Zweitens wurde analysiert, ob es nicht auch andere Gründe für die beobachtete Korrelation zwischen Wolkenbildung und kosmischer Strahlung gibt und drittens wurde nach unabhängigen Phänomenen gesucht, mit denen die Hypothese überprüft werden konnte.

Eine der ersten wichtigen Arbeiten, die sich mit der Gültigkeit der GCR-Wolken-Hypothese auseinandergesetzt haben, war Kernthaler et al [42]. Sie haben den behaupteten Zusammenhang für unterschiedliche Wolkentypen und -höhen geprüft und dabei keinen klaren Zusammenhang gefunden. Sie haben außerdem festgestellt, dass die Amplitude der Variation in der Bewölkung abnimmt, wenn man Daten inkludiert, die aus hohen Breiten stammen. Das steht im Widerspruch zu der Tatsache, dass dort die Ionisation durch die kosmische Strahlung stärker wirkt als in den gemäßigten Breiten, die [87] und [84] untersucht haben.

Auch Jørgensen & Walløe [41] haben sich mit der Datengrundlage von Svensmark und Friis-Christensen auseinandergesetzt. Sie kritisierten die Auswahl der Daten und wiesen darauf hin, dass alternativen Erklärungen (wie zum Beispiel Vulkanismus oder ein El-Niño-Ereignis) nicht untersucht worden sind.

Farrar [25] hat die Wolkenbedeckung räumlich aufgelöst analysiert und festgestellt, dass es nur für manche Regionen einen Zusammenhang mit dem Fluss der kosmischen Strahlung gibt. Die Muster der Bewölkung passten seinen Ergebnissen nach besser zu den Veränderungen, die ein El-Niño-Ereignis verursachen kann.

Kristjánsson & Kristiansen [50] haben die Daten von Svensmark und Friis-Christensen, den C2-Wolken-Datensatz des International Satellite Cloud Climatology Project - ISCCP, durch den umfangreicheren und genaueren D2-Datensatz ergänzt und darin keine Korrelation mit der kosmischen Strahlung gefunden. Kombiniert man beide Datensätze, verliert sich jeder Zusammenhang mit der kosmischen Strahlung nach dem Jahr 1989.

Pallé & Butler (2002) [63] haben in Langzeitdaten Hinweise gefunden, dass die globale totale Bewölkung im Laufe des letzten Jahrhunderts angestiegen ist, was der Hypothese einer Modulation durch die kosmischen Strahlung widerspricht. Nur bei den niedrigen Wolken konnte ein Zusammenhang aufgrund fehlender Langzeitdaten nicht ausgeschlossen werden.

Sloan & Wolfendale 2008 [81] untersuchten Forbush-Ereignisse zur Prüfung der Hypothese. Diese spontanen und kurzfristigen Veränderungen in der Intensität kosmischer Strahlung sollten sich auf die Wolkenbildung auswirken. Dafür konnte aber kein Beleg gefunden werden. Calogovic et al [6] haben ebenfalls die Auswirkungen von Forbush-Ereignissen untersucht und festgestellt, dass es keinen Zusammenhang mit der Wolkenbildung gibt.

Kulmala et al [52] haben eine mögliche Korrelation zwischen Messungen zur Aerosolbildung und der kosmischen Strahlung untersucht und dabei keine relevanten Zusammenhänge entdeckt.

Im Jahr 2012 haben Laken et al [54] den damaligen Forschungsstand zusammengefasst und alle vorhandenen Daten neu bewertet. Ihr Fazit: Es gibt keine Belege für einen relevanten Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und Wolkenbildung. Falls so eine Korrelation dennoch existieren sollte, kann sie keine merkbaren Einflüsse auf den Klimawandel haben.

In Abbildung 3 sind die Maxima der Sonnenzyklen 23 und 24 (nach [90]) ersichtlich. Sollte die GCR-Wolken-Hypothese korrekt sein, müsste sich ein möglicher Zusammenhang im Laufe einiger Zyklen deutlich zeigen. Sloan & Wolfendale [82] haben u.a. das in ihrer Arbeit aus dem Jahr 2013 untersucht und mit Daten der Sonnenzyklen 22 und 23 festgestellt, dass eine etwaige Korrelation im Zyklus 23 nicht mehr zu sehen war.

Bis zum Jahr 2013 hatte die wissenschaftliche Community die GCR-Wolken-Hypothese auf unterschiedlichste Weise geprüft und festgestellt, dass der von Svensmark ursprünglich behauptete Zusammenhang entweder nicht existiert oder, wenn doch, nur einen für die Einschätzung des Klimawandels vernachlässigbaren Einfluss hat. Zusätzlich wurde dieses Bild vom CLOUD-Experiment am CERN maßgeblich gestützt, das Thema des nächsten Abschnitts ist.

4.3 Experimentelle Untersuchungen: CLOUD Experiment am CERN

Die von Svensmark und Friis-Christensen [87] vorgeschlagene Hypothese eines Zusammenhangs zwischen Sonnenaktivität, galaktischer kosmischer Strahlung (GCR) und Wolkenbildung lenkte die Aufmerksamkeit auf einen bislang nur unzureichend verstandenen Bereich der Atmosphärenphysik. Während Beobachtungsstudien auf mögliche Korrelationen zwischen kosmischer Strahlung und der globalen Wolkenbedeckung hinwiesen, blieb insbesondere der zugrunde liegende mikrophysikalische Mechanismus ungeklärt. Vor allem die Frage, ob die durch kosmische Strahlung verursachte Ionisation die Bildung atmosphärischer Aerosole und damit letztlich die Wolkenbildung beeinflussen kann, war experimentell bislang nicht untersucht worden.

Vor diesem Hintergrund wurde unter der Leitung von Jasper Kirkby das CLOUD-Experiment (Cosmics Leaving OUTdoor Droplets) vorgeschlagen [43]. Das am CERN Proton Synchrotron durchgeführte Experiment sollte die physikalischen Prozesse der Aerosol- und Wolkenbildung erstmals unter kontrollierten, reproduzierbaren Laborbedingungen und atmosphärisch realistischen Bedingungen untersuchen. Dabei sollte insbesondere überprüft werden, ob die durch die Sonnenaktivität modulierte galaktische kosmische Strahlung über ionisationsbedingte Prozesse die Bildung neuer Aerosolpartikel und damit indirekt die Wolkenbildung beeinflussen kann.

Neben dem experimentellen Nachweis eines möglichen Zusammenhangs verfolgte das CLOUD-Projekt das Ziel, die zugrunde liegenden mikrophysikalischen Prozesse zu identifizieren und quantitativ zu beschreiben. Die gewonnenen Ergebnisse sollten anschließend in numerische Modelle der Aerosol- und Wolkenbildung integriert werden, um die klimatische Bedeutung möglicher Veränderungen der kosmischen Strahlung und deren Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde bewerten zu können. Im Proposal “A Study of the Link Between Cosmic Rays and Clouds with a Cloud Chamber at the CERN PS“ [88] formulierten die Autoren im April 2001 folgende wissenschaftliche Hauptziele:

- Untersuchung des Zusammenhangs zwischen kosmischer Strahlung und der Bildung von Ionen, Aerosolpartikeln, Wolkentröpfchen sowie Eiskristallen,
- Identifikation der mikrophysikalischen Prozesse, über welche kosmische Strahlung die Eigenschaften von Aerosolen und Wolken beeinflussen könnte,
- experimentelle Untersuchung dieser Prozesse unter atmosphärisch relevanten Bedingungen sowie
- Integration der experimentellen Ergebnisse in Modelle der Aerosol- und Wolkenbildung, um den möglichen Beitrag kosmischer Strahlung zur natürlichen Klimavariabilität abzuschätzen.

Um den möglichen Zusammenhang zwischen galaktischer kosmischer Strahlung und der Wolkenbildung experimentell untersuchen zu können, identifizierten die Forschenden im CLOUD-Proposal mehrere physikalische und chemische Prozessketten, über die kosmische Strahlung die Eigenschaften von Aerosolen und Wolken direkt oder indirekt beeinflussen könnte. Da Wolkenbildung ein komplexer Prozess ist, der von zahlreichen atmosphärischen Parametern abhängt, konzentrierte sich das Experiment auf diejenigen Prozesse, bei denen die durch kosmische Strahlung verursachte Ionisation theoretisch einen messbaren Einfluss ausüben könnte. Im Mittelpunkt standen dabei insbesondere die Vorgänge in der Troposphäre, in der Aerosolpartikel zu Wolkenkondensationskernen (*Cloud Condensation Nuclei*, CCN) heranwachsen und somit die Bildung von Wolkentröpfchen ermöglichen. Eine erhöhte Zahl von Wolkenkondensationskernen könnte somit die mikrophysikalischen Eigenschaften von Wolken verändern, etwa die Tröpfchenanzahl, die Tröpfchengröße oder die optische Dicke. Dadurch würde sich auch die planetare Albedo verändern. Im einfachsten Fall führt eine Zunahme reflektierender niedriger Wolken zu einer stärkeren Rückstreuung kurzwelliger Sonnenstrahlung und damit zu einem negativen Strahlungsantrieb. Im Proposal [88] wurden folgende fünf mögliche Wirkungsmechanismen beschrieben:

1. **Verstärkte Aerosolneubildung und Wachstum zu Wolkenkondensationskernen:** Durch die von der kosmischen Strahlung erzeugten Ionen könnten neue Aerosolpartikel entstehen oder bestehende Partikel schneller wachsen und dadurch häufiger als CCN wirken.
2. **Verstärkte Aktivierung von Wolkenkondensationskernen durch elektrische Ladung:** Elektrisch geladene Aerosolpartikel könnten Wassertröpfchen leichter bilden als ungeladene Partikel.
3. **Bildung kondensierbarer Dämpfe durch ionenchemische Prozesse:** Die durch Ionisation entstehenden Ionen und Radikale könnten chemische Reaktionen auslösen, welche zusätzliche kondensierbare Spurengase erzeugen und dadurch das Wachstum von Aerosolpartikeln fördern.
4. **Bildung von Eiskeimen:** Kosmische Strahlung könnte die Entstehung von Eiskristallen oder Eiskeimen beeinflussen und damit insbesondere die Eigenschaften kalter Wolken verändern.
5. **Einfluss auf polare stratosphärische Wolken:** Darüber hinaus wurde ein möglicher Einfluss der kosmischen Strahlung auf die Bildung polarer stratosphärischer Wolken diskutiert, die eine wichtige Rolle beim stratosphärischen Ozonabbau spielen.

Die im CLOUD-Proposal vorgeschlagenen Wirkungswege sind in Abbildung 5 zusammengefasst. Sie verdeutlichen, wie Änderungen der Sonnenaktivität über eine Modulation des Sonnenwinds die Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung verändern und dadurch verschiedene mikrophysikalische Prozesse der Aerosol- und Wolkenbildung beeinflussen könnten. Eine erhöhte Anzahl an Wolkenkondensationskernen könnte die mikrophysikalischen Eigenschaften von Wolken verändern, beispielsweise die Anzahl und Größe der Wolkentröpfchen oder deren optische Dicke. Insbesondere eine Zunahme tiefer, stark reflektierender Wolken würde die planetare Albedo erhöhen und dadurch zu einem negativen Strahlungsantrieb beitragen.

4.3.1 Versuchsaufbau und experimentelle Durchführung

Das grundlegende Konzept des CLOUD-Experiments bestand darin, den vermuteten Zusammenhang zwischen galaktischer kosmischer Strahlung und der Wolkenbildung unter kontrollierten Labor-

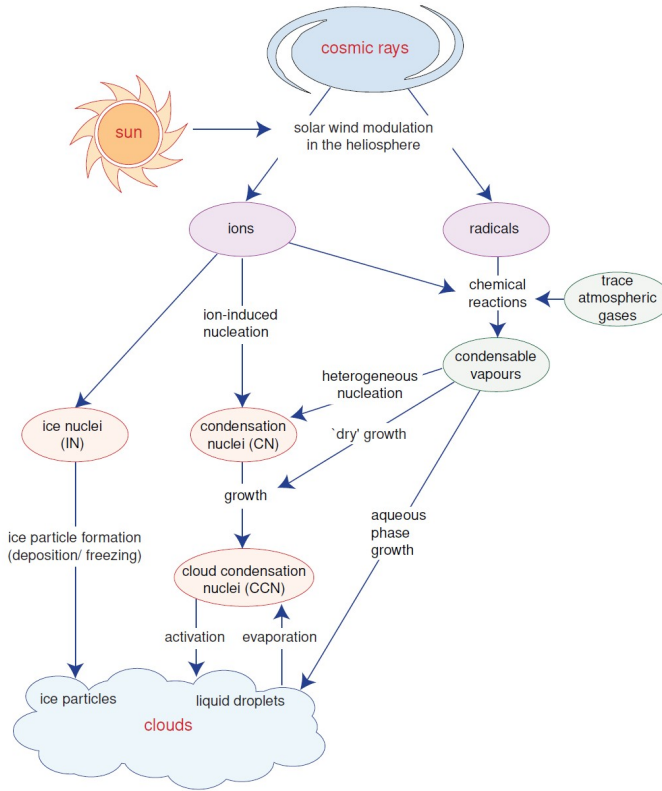


Abbildung 5: Prozessdarstellung aus dem CLOUD-Proposal. Sie zeigt, über welche Wirkungswege, die Modulation der kosmischen Strahlung die Wolkenbildung beeinflusst (Grafik aus [44])

bedingungen zu untersuchen. Dazu wurde am CERN eine Expansionsnebelkammer (*Cloud Chamber*) entwickelt, in der die atmosphärischen Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit und chemischer Zusammensetzung reproduziert werden konnten. Im Gegensatz zu Messungen in der Atmosphäre ließen sich hier sämtliche Versuchsparameter kontrollieren und unabhängig voneinander variieren. Insbesondere die Ionisationsrate konnte gezielt verändert werden, ohne auf die natürliche Variation der kosmischen Strahlung während des Sonnenzyklus angewiesen zu sein. Die Nebelkammer wurde mit hochreinen Spurengasen befüllt. Zahlreiche Messinstrumente bestimmten die physikalischen und die chemischen Eigenschaften der entstehenden Aerosolpartikel kontinuierlich. Dadurch konnten die Bildung neuer Partikel, ihr Wachstum sowie ihre Eigenschaften unter definierten atmosphärischen Bedingungen untersucht werden. Zur Simulation der durch galaktische kosmische Strahlung verursachten Ionisation wurde am CERN Proton Synchrotron ein Protonenstrahl erzeugt. Dieser traf auf ein Target und erzeugte einen Sekundärstrahl, der überwiegend aus Pionen bestand. Beim Durchgang durch die CLOUD-Kammer verursachten diese Teilchen eine Ionisation der Gasmoleküle, deren Intensität derjenigen sekundärer Teilchenschauer in der Erdatmosphäre entsprach. Auf diese Weise konnte der Einfluss der Ionisation auf die Bildung und das

Wachstum von Aerosolpartikeln unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden.

Ein wesentlicher Vorteil des Versuchsaufbaus bestand darin, dass der Teilchenstrahl gezielt ein- und ausgeschaltet sowie seine Intensität variiert werden konnte. Zusätzlich verfügte die Kammer über ein elektrisches *Clearing Field*, mit dem die in der Kammer erzeugten Ionen innerhalb kurzer Zeit entfernt werden konnten. Durch den Vergleich von Messungen mit Teilchenstrahl, ohne Teilchenstrahl sowie mit aktiviertem Clearing Field ließ sich der Einfluss der Ionisation auf die Nukleation und das Wachstum von Aerosolpartikeln quantitativ bestimmen.

4.3.2 Wesentliche Ergebnisse

Die wissenschaftlichen Arbeiten und Publikationen im Rahmen des CLOUD-Experiments sind am CERN Document Server (CDS) [9] aufgelistet. Mit Stand 30. Juni 2026 sind in der Datenbank 116 Datensätze als CLOUD Papers gelistet, der aktuellste Eintrag stammt vom 27.01.2026. Mit der Einschränkung auf „cosmic rays“ liefert die Datenbank 22 Einträge, die auch Beiträge in Workshops und Konferenzen beinhalten. Die früheste Veröffentlichung davon ist von Kirkby & Laaksonen [47] (die in der Literaturanalyse im letzten Abschnitt bereits berücksichtigt wurde). Dort wurde die GCR-Wolken-Hypothese neutral betrachtet und darauf hingewiesen, dass notwendige, experimentelle Methoden zur Überprüfung in Planung waren. In der Zusammenfassung dieser Arbeit wurde das grundlegende Konzept von CLOUD kurz vorgestellt und eine Verbesserung des Verständnisses eines etwaigen Zusammenhangs in Aussicht gestellt.

Zwischen Oktober und November 2006 fand ein erster vierwöchiger Testlauf der Anlage statt, deren Ergebnisse in [21] vorgestellt wurden. Ziel war sowohl die technische Überprüfung des Aufbaus als auch die Überprüfung, ob sich die atmosphärische Nukleation realistisch simulieren lässt. Es erfolgten erste Untersuchungen zum Einfluss ionisierender Strahlung auf die Aerosolbildung. Dabei wurden 44 „nucleation bursts“ produziert und aufgezeichnet. Die experimentell bestimmten Aerosolbildungsraten waren, wie die Schwefelsäurekonzentration, vergleichbar mit denen in der Atmosphäre. Neben diesen zu erwarteten Nachweis der zentralen Rolle von Schwefelsäure bei der Aerosolbildung, beobachteten die Forschenden auch unerwartete Arten der Partikelneubildung, die die Anwesenheit von zusätzlichen Spurengasen in der Aerosolkammer nahelegten. Deren Natur war vorerst noch unklar. Da eine Freisetzung aus den Kammerwänden als mögliche Ursache in Frage kam, musste die Kontrolle der Bedingungen in der Kammer noch verbessert werden. Die Arbeit zeigte dennoch, dass das CLOUD-Experiment prinzipiell funktioniert. Zusätzlich haben Duplissy et al [21] demonstriert, dass Ionen durchaus eine Rolle bei der Aerosolbildung spielen können, auch wenn der genau Prozess und das Ausmaß des Einflusses der galaktischen kosmischen Strahlung erst in weiteren Experimenten geklärt werden musste.

Die ersten wichtigen Resultate des eigentlichen CLOUD-Experiments wurden von Kirkby et al. im Jahr 2011 präsentiert [46]. Sie betreffen die Rolle von Schwefelsäure, Ammoniak und galaktischer kosmischer Strahlung auf die Aerosolnukleation. Dabei wurde festgestellt, dass atmosphärisch relevante Ammoniakmengen (100 ppb pro Volumen) die Nukleationsrate von Schwefelsäurepartikeln um das hundert- bis tausendfache erhöhen kann. Die Ammoniakmoleküle lagern sich schrittweise an die Schwefelsäure an und können dadurch die Verdampfung reduzieren. Ionen, wie sie von der galaktischen kosmischen Strahlung gebildet werden, können die Nukleationsrate ebenfalls erhöhen, aber in einem weit geringeren Ausmaß. Bei Ionisationsraten, die der galaktischen kosmischen Strah-

lung in Bodennähe entsprechen, zeigte das Experiment unter bestimmten Bedingungen eine zwei bis zehnfache Erhöhung der Aerosolkernbildung. In diesem Stadium konnte das CLOUD-Experiment bestätigen, dass die von kosmischer Strahlung ausgelösten Ionisationsereignisse tatsächlich die Bildung von Aerosolen fördern können. Das Ausmaß dieses Effekts und die konkreten Bedingungen, unter denen galaktische kosmische Strahlung diesen Effekt haben kann, blieben aber weiterhin unklar. Kirkby et al. betonten dennoch die Bedeutung der Experimente für die GCR-Wolken-Hypothese:

”These are important findings for the potential link between galactic cosmic rays and clouds”.

Zwei Jahre später wurden von Almeida et al. [1] die Ergebnisse weiterer Experimente publiziert, die sich mit der Rolle von Aminen bei der Nukleation von Schwefelsäure beschäftigt haben. Damit sollten einige der offenen Fragen aus der Arbeit von Kirby et al. [46] geklärt werden, in der gezeigt wurde, dass Schwefelsäure und Ammoniak nicht ausreichen, um die beobachteten Nukleationsraten zu erklären. Schon kleinste Mengen von Dimethylamin (3 ppb pro Volumen) können die Nukleationsrate um das tausendfache gegenüber des in [46] festgestellten Effekts von Ammoniak steigern. Der Mechanismus ist auf molekularer Ebene vergleichbar mit der stabilisierenden Wirkung des Ammoniak, aber die von Aminen und der Schwefelsäure gebildeten Säure-Amin-Paare sind noch stärker gebunden und können die Verdampfung dadurch noch effizienter reduzieren. Die Anwesenheit von Dimethylamin hat einen so großen Einfluss auf die Aerosolbildung, dass die Nukleation bei atmosphärischen Bedingungen vor allem durch die Verfügbarkeit von Schwefelsäure begrenzt wird und nicht durch die Amin-Konzentration. Auch bei diesen Experimenten konnte ein Einfluss der Ionisation durch galaktische kosmische Strahlung auf die Bildung von Schwefelsäure-Dimethylamin-Cluster nachgewiesen werden, der aber nur dann relevant ist, wenn die insgesamt Aerosolbildungsrate gering ist. Die elektrisch neutral geladenen Säure-Amin-Verbindungen sind so stabil, dass eine elektrische Ladung durch Ionisation keinen großen Vorteil für die weitere Nukleation bietet. Die Arbeit von Almeida et al. kommt einerseits zu dem Schluss, dass die Bedeutung von Spurengasen wie Aminen wichtiger für die Aerosolbildung, ist als die Ionisation durch kosmische Strahlung. Andererseits weist sie auch darauf hin, dass der Einfluss der atmosphärischen Amine (die sehr oft einen anthropogenen Ursprung haben) in den damaligen Klimamodellen nicht oder zu wenig berücksichtigt wurde, und die Unsicherheiten über den Einfluss von Aerosolen auf das Klima und die Wolken größer sind als bisher gedacht.

Ein aus den CLOUD-Experimenten abgeleitetes globales Modell der Entstehung von atmosphärischen Partikeln wurde von Dunne et al. [20] im Jahr 2016 präsentiert. Die einzelnen Messungen in der CLOUD-Kammer wurden in einer umfassenden Studie zu einem Gesamtbild der Atmosphäre zusammengeführt. Die Resultate zeigten, dass binären Nukleationspfade (bei denen zwei Stoffe beteiligt sind, zum Beispiel Schwefelsäure und Wasser), die in den frühen Arbeiten untersucht wurden, nur eine vergleichsweise geringe Rolle spielen. In den unteren Atmosphärenschichten ist die Schwefelsäurekonzentration meist zu niedrig, um stabile Cluster zu bilden. Sie verdampfen, bevor sie groß genug werden, um zur Aerosolbildung beitragen zu können. Unterhalb von 15 km Höhe zeigte das Modell von Dunne et al. drei relevante Nukleationspfade. Nur 15 % der Partikel von 3 nm Größe entstehen dabei durch binäre Nukleation. Der überwiegende Teil von 65 % bildet sich aus ternärer anorganischer Nukleation unter der stabilisierenden Wirkung von Ammoniak und rund 21 % aus ternärer organischer Nukleation, bei der oxidierte α -Pinene die Cluster stabil halten. Diese organischen Stoffe haben ihren Ursprung unter anderem in den Emissionen von Pflanzen. Ionisierung spielt bei allen drei Pfaden eine Rolle; die Forschenden konnten den Anteil der durch

Ionisation neugebildeten Partikel mit insgesamt 28 % nur abschätzen und nicht exakt quantifizieren. Der Effekt auf die Wolkenbildung ist dennoch klein. Dunne et al. hatten ausdrücklich auch untersucht, was passiert, wenn sich die Ionisationsrate durch die galaktische kosmische Strahlung zwischen dem solaren Minimum und Maximum verändert: Die mittlere Änderung der Konzentration von Wolkenkondensationskeime in der relevanten atmosphärischen Schicht beträgt nur circa 0,1 %. Lokale Änderungen erreichen ein Ausmaß von höchstens 1 %. Ionisation ist demnach zwar ein relevanter Faktor, der von Svensmark behauptete Einfluss durch die Modulation der Intensität der kosmischen Strahlung durch die Sonnenaktivität, ist jedoch stark begrenzt.

Dieses Ergebnis wurde qualitativ in der Arbeit von Gordon et al [33] bestätigt, die das CLOUD-Experiment genutzt haben, um die präindustriellen Bedingungen mit der gegenwärtigen Atmosphäre zu vergleichen. In beiden Fällen fanden sie einen vernachlässigbar kleinen Einfluss der galaktischen kosmischen Strahlung auf die Konzentration von Wolkenkondensationskeimen. Der Effekt variiert je nach Jahreszeit und Wolkenhöhe und ist für die präindustrielle Zeit minimal stärker als in der Gegenwart; liegt aber in allen Fällen unter einem Prozent. 2024 hatten Christoudias et al. [11] das CLOUD-Experiment genutzt und die Auswirkungen einer nahen Supernova auf die Erdatmosphäre untersucht. Sie hatten einen kurzfristigen 100-fachen Anstieg der Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung simuliert und gezeigt, dass Atmosphäre und Klima der Erde im Allgemeinen dadurch nicht stark gestört werden.

4.4 Die GCR-Wolken-Hypothese in den Sachstandsberichten des IPCC

Die Sachstandsberichte (Assessment Reports) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sollen den aktuellen Wissensstands zum Klimawandel darstellen und ihn wissenschaftlich bewerten. Sie gehören zu den umfassendsten Analysen wissenschaftlicher Literatur und erscheinen seit dem Jahr 1990. In den Berichten wird auf die verschiedenen natürlichen und anthropogenen Faktoren eingegangen, die das Klima der Erde verändern können, inklusive der Aktivität der Sonne. Im folgenden soll ein Überblick über die Darstellung und Bewertung der GCR-Wolken-Hypothese in den bisherigen sechs Sachstandsberichten gegeben werden.

Der erste Sachstandsbericht erschien im Jahr 1990 [78] und enthält in Kapitel 2 („Radiative Forcing of Climate“) den Unterabschnitt „2.3.1.2 Variability due to changes in total solar irradiance“. Der 11-jährige Aktivitätszyklus wird darin kurz angesprochen. Es wird erwähnt, dass durch Schwankungen im Ultraviolettbereich während eines Zyklus, Änderungen von höchstens 0,01 % der gesamten Sonneneinstrahlung verursacht werden können. Der Rest des Abschnitts beschäftigt sich mit zeitlichen Veränderungen der Solarkonstante und möglichen Ursachen dafür.

Im 1996 erschienenen zweiten Sachstandsbericht [73] wird in Abschnit 2.4.4 des zweiten Kapitels ebenfalls „Solar Variability“ diskutiert. Darin wird auf den, kurz zuvor veröffentlichten, Spezialreport „Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios“ [38] verwiesen, der sich ausführlich mit Veränderungen der auf der Erde auftreffenden Sonnenstrahlung beschäftigt. Es wird auf Arbeiten hingewiesen, die eine Korrelation zwischen Sonnenflecken oder Sonnenaktivität und den Eigenschaften der Atmosphäre, untersucht haben. Sie werden aber als „controversial on statistical grounds“ bewertet. Der zweite Sachstandsbericht kommt in seiner Auswertung der wissenschaftlichen Literatur zu dem Schluss, dass die Einflüsse der solaren Veränderlichkeit deutlich kleiner sind als der menschengemachte auf die At-

mosphäre. Für eine Einschätzung des Effekts von Aerosolen auf die Wolkenbildung hat der Bericht nicht genügend quantitative Studien als Grundlage für eine Bewertung gefunden.

Der dritte Sachstandsbericht aus dem Jahr 2001 [66] war der erste, der seit den Publikationen von Svensmark und Friis-Christensen ([87], [84]) erschienen ist. Diese Arbeiten werden in Abschnitt 6.11.2.2 („Cosmic rays and clouds“) explizit angesprochen und untersucht, ebenso wie die restliche wissenschaftliche Literatur zu diesem Thema, die seit 1997 erschienen ist. Die Bewertung des Forschungsstands zur GCR-Wolken-Hypothese kommt zu dem Schluss, dass derzeit nicht genügend Belege existieren, um zu bestätigen, dass die Wolkenbedeckung durch die Sonnenaktivität beeinflusst wird.

Im vierten Sachstandsbericht aus dem Jahr 2007 [27] wird die GCR-Wolken-Hypothese in Kapitel 2.7.4 untersucht. Dort wird zuerst festgestellt, dass seit dem dritten Sachstandsbericht neue Arbeiten die Evidenz für einen (auch) solaren Antrieb des Klimawandels verstärkt haben. Damit sind aber vor allem direkte Effekte der Sonnenaktivität auf die gesamte solare Einstrahlung gemeint; indirekte Effekte wie durch die galaktische kosmische Strahlung werden als „least certain, and under ongoing debate“ beschrieben. Die GCR-Wolken-Hypothese wird im vierten Sachstandsbericht ausführlich erklärt, und ihr Rezipieren in der wissenschaftlichen Literatur dargestellt. Der Bericht erwähnt die statistischen Probleme (die hier in Abschnitt 4.2 erwähnt wurden), weist aber auch auf Arbeiten hin, die lokale statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen kosmischer Strahlung und Wolkenbildung gezeigt haben. Am Ende kommt der vierte Sachstandsbericht zu dem Schluss, dass sich das wissenschaftliche Verständnis über den Einfluss der Sonnenaktivität auf das Klima seit dem dritten Bericht zwar verbessert hat, während das Verständnis für Einflüsse der kosmischen Strahlung weiterhin als „sehr gering“ eingestuft werden muss. In Tabelle 2.11 des Berichts wird der Status der wissenschaftliche Belege für einen Klimaeinfluss der kosmischen Strahlung mit „C“ bewertet („ungenügende Evidenz“). Der Status des wissenschaftlichen Konsens dazu wird mit „3“ angegeben („ungenügender Konsens“). Der daraus für die GCR-Wolken-Hypothese abgeleitete LOSU-Wert („Level Of Scientific Understanding“) liegt demnach bei „very low“.

Im 2013 erschienenen fünften Sachstandsbericht [5] gibt es im Teil der Arbeitsgruppe I („Climate Change 2013: The Physical Science Basis“) ein eigenes Kapitel zum Thema „Clouds and Aerosols“. Unterkapitel 7.4.6 beschäftigt sich explizit mit dem „Impact of Cosmic Rays on Aerosols and Clouds“. Wie in Kapitel 4.2 dieser Arbeit dargestellt, hatte sich bis zum Jahr 2013 ein weitestgehender Konsens zur Gültigkeit der GCR-Wolken-Hypothese entwickelt, der im Sachstandsbericht entsprechend dargestellt wird. Die Korrelation zwischen kosmischer Strahlung und den Eigenschaften von Aerosolen und Wolken wird als „weak and local at best“ bewertet und nicht „robust on the regional or global scale“. Für die Aussage, dass der GCR-Mechanismus zu schwach ist, um klimatisch signifikant wirken zu können, findet der Bericht „medium evidence“ und „high agreement“. Das Thema des solaren Einflusses auf das irdische Klima wird in Kapitel 10 des Berichts erneut aufgegriffen und nicht nur im Kontext der kosmischen Strahlung, sondern allgemein betrachtet. Der Bericht kommt zu dem Schluss, dass es „extremely unlikely“ ist, dass der Einfluss der Sonne auf die seit 1950 beobachtete globale Erwärmung größer ist, als der der Treibhausgase². Der solare Antrieb kann zwischen 1951 und 2010 nur für höchstens 0,1 Grad Erwärmung verantwortlich gewesen sein. Die Veränderung der globalen mittleren Oberflächentemperatur zwischen einem Maximum und Mi-

²In der kalibrierten Sprache der IPCC-Sachstandsberichte bedeutet „extremely unlikely“, dass nur eine Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 5 % besteht, dass die Aussage korrekt ist

nimum der Sonnenaktivität liegt in der Größenordnung von 0,1 Grad Celsius.

Der zur Zeit aktuellste Sachstandsbericht ist in den Jahren 2021 bis 2023 erschienen. Der für diese Arbeit relevante Teil der Arbeitsgruppe I wurde im Jahr 2021 publiziert [28]. Der Einfluss der galaktischen kosmischen Strahlung wird darin in Kapitel 7.3.4.5 diskutiert. Der Bericht stellt fest, dass der Zusammenhang zwischen der Intensität galaktischer kosmischer Strahlung und der Aersolbildung seit dem fünften Bericht gründlich untersucht worden ist, und erwähnt dabei insbesondere das CLOUD-Experiment. Daraus, und aus anderen Publikationen, kommt der Bericht zu dem Schluss, dass es „unlikely“ ist, dass kosmische Strahlung das gegenwärtige Klima beeinflusst. Der sechste Sachstandsbericht erwähnt auch weitere Arbeiten von Svensmark et al, die immer noch eine Verbindung zwischen GCR und Klima postulieren. Sie stellen jedoch auch fest, dass viele andere Studien, die behaupteten Zusammenhänge kritisieren. Insgesamt wird die seit dem fünften Sachstandsbericht publizierte Forschung als unterstützend für die damals veröffentlichte Schlussfolgerung bewertet. Der sechste Sachstandsbericht stellt am Ende fest, dass der Einfluss der GCR auf Veränderungen in der Energiebilanz der Erde zwischen 1750 und 2019 mit „high confidence“ vernachlässigbar ist.

5 Diskussion

Die Untersuchung der Entwicklung des wissenschaftlichen Konsens zur GCR-Wolken-Hypothese hat gezeigt, dass die ursprünglichen Arbeiten von Svensmark und Friis-Christensen von der wissenschaftlichen Community vorerst ernst genommen wurden. In den ersten Jahren nach der Veröffentlichung der Arbeiten gab es viele Publikationen, die das Thema aufgegriffen haben. Der Anteil der Arbeiten, die die GCR-Wolken-Hypothese positiv aufgenommen haben, war (mit Ausnahme von 2001) in alle Jahren von 1999 bis 2013 größer oder gleich groß als die Arbeiten, die sich negativ damit auseinandergesetzt haben. Die GCR-Wolken-Hypothese wurde als interessanter und vielversprechender Mechanismus für das Verständnis der Atmosphäre und des irdischen Klimas angesehen. Gleichzeitig wurden die Daten immer wieder geprüft und mit neuen Datensätzen erweitert. Die prinzipielle Plausibilität eines Einflusses von galaktischer kosmischer Strahlung auf Wolkenbildung und Klima wurde weitestgehend akzeptiert, die Stärke des Effekts blieb aber weiterhin Teil der wissenschaftlichen Diskussion.

Fast unmittelbar nach den ersten Veröffentlichungen von Svensmark und Friis-Christensen wurde das CLOUD-Experiment vorgeschlagen, um die Thesen experimentell unter Laborbedingungen prüfen zu können. Die Ergebnisse von CLOUD haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Intensität galaktischer kosmischer Strahlung zu mehr Ionenbildung in der Atmosphäre führen kann und, unter bestimmten Umständen, zu einer verstärkten Bildung von Aerosolen und Wolkenkondensationskernen. Sie zeigten jedoch auch, dass die Ionen nicht der ausschlaggebende Faktor für die Wolkenbildung sind, sondern die Konzentration diverser Spurengase in der Atmosphäre: Die Chemie der Atmosphäre ist relevanter für das irdische Klima, als die galaktische kosmische Strahlung.

In der Entwicklung eines wissenschaftlichen Konsens zur GCR-Wolken-Hypothese war das Jahr 2014 ein Wendepunkt. Einerseits wurden bis dahin die meisten der relevanten Artikel veröffentlicht, die Schwachstellen in der Formulierung der GCR-Wolken-Hypothese und der Datenlage identifiziert hatten (siehe dazu Abschnitt 4.2). Andererseits waren die in Abschnitt 4.3.2 zusammengefassten wesentlichen Ergebnisse des CLOUD-Experiments mittlerweile ebenfalls publiziert. Gleichzeitig waren seit den ersten Veröffentlichungen von Svensmark und Friis-Christensen 15 Jahre vergangen, ein Zeitraum der länger als die durchschnittliche Periode des Sonnenzyklus von 11 Jahren ist. Das Maximum des Sonnenzyklus Nummer 23 fand 2003 statt, das Maximum von Zyklus Nummer 24 im Jahr 2014. Eine Modulation der Wolkenbildung durch das Zusammenspiel von solarer Aktivität und galaktischer kosmischer Strahlung konnte über diesen längeren Zeitraum nicht festgestellt werden. Nachdem im ebenfalls 2014 erschienenen Fünften Sachstandsbericht des IPCC der gesammelte Stand des Wissens zusammengefasst und die Gültigkeit der GCR-Wolken-Hypothese als „extrem unwahrscheinlich“ bewertet wurde (siehe Abschnitt 4.4), hatte sich der wissenschaftliche Konsens im Wesentlichen etabliert. Der Einfluss (galaktischer) kosmischer Strahlung auf die irdische Atmosphäre wurde (und wird) zwar weiterhin untersucht und auch der Einfluss der solaren Aktivität auf das Klima ist weiterhin Forschungsthema in der Klimawissenschaft. Die Forschung und die Experimente der letzten 25 Jahre haben aber eindeutig gezeigt, dass davon kein relevanter Einfluss auf den aktuellen Klimawandel ausgeht.

Die GCR-Wolken-Hypothese kann als gutes Beispiel für den epistemologischen Prozess in der Naturwissenschaft dienen. Die Hypothese von Svensmark et al. wurde vom Rest der wissenschaftlichen Community nicht ignoriert. Man hat sich ausführlich damit auseinandergesetzt, Daten und Thesen geprüft und versucht, durch neue Forschungsprojekte und groß angelegte Experimente wie

CLOUD, Klarheit zu schaffen. Am Ende dieses Prozesses steht die Erkenntnis, dass die galaktische kosmische Strahlung durchaus einen Einfluss auf die Wolkenbildung haben kann, so wie von Svensmark et al. ursprünglich postuliert. Im Gegensatz zu den Behauptungen von Svensmark et al. ist dieser Einfluss aber zu gering, um als relevante Erklärung für die beobachtete Erwärmung des irdischen Klimas dienen zu können.

6 Fazit und Ausblick

Die Literaturanalyse, das CLOUD-Experiment und die IPCC-Berichte haben gezeigt, dass die galaktische kosmische Strahlung keinen relevanten Einfluss auf den aktuellen Klimawandel hat. Dennoch gibt es einige offene Fragen zu diesem Themenkomplex, die in der Wissenschaft weiterhin diskutiert werden. Dazu gehört, zum Beispiel, ein detailliertes Verständnis der Rolle der Spurengase in der Atmosphäre bei der Wolkenbildung [20] oder die Empfindlichkeit der präindustriellen Atmosphäre auf die galaktische kosmische Strahlung ([33, 45]). Auch die Auswirkungen der galaktischen kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre und das irdische Klima bei Extremereignissen wie Supernovae sind Thema aktueller Forschungsarbeiten [11], ebenso wie die Auswirkungen von Aersolen auf die menschliche Gesundheit und die Rolle der (galaktischen) kosmischen Strahlung bei ihrer Entstehung [45].

Im Kontext des anthropogenen Klimawandels spielen die Arbeiten von Svensmark et al. keine Rolle mehr. Sie tauchen im Zusammenhang mit dem Klimawandel heute vor allem im Umfeld von Verschwörungstheorien, politisch extremen Parteien und Organisationen, die menschliche Ursachen für den Klimawandel leugnen, auf. Henrik Svensmark war, zum Beispiel, am 27. Juni 2026 bei einer Tagung des Vereins EIKE zu Gast, der die menschengemachte globale Erwärmung leugnet [32]. Alice Weidel, Politikerin der rechten Partei AfD in Deutschland hat die GCR-Wolken-Hypothese noch 2019 als Argument gegen einen menschengemachten Klimawandel angeführt [31], ebenso wie Heinz-Christian Strache, der damalige Chef der rechten Partei FPÖ in Österreich [29]).

Die Frage, ob die Sonnenaktivität und die galaktische kosmische Strahlung die relevante Ursache für die beobachtete Erwärmung des Erdklimas sind, und nicht die menschengemachten Treibhausgase, ist beantwortet. Wenn es bei diesem Thema noch offene Fragen gibt, dann sind es keine naturwissenschaftlichen Fragen mehr, sondern betreffen den Bereich der Wissenschaftskommunikation. Die in Gesellschaft und Politik zum Teil immer noch andauernde Debatte über die Ursache des Klimawandels zeigt die Bedeutung der Vermittlung eines Verständnisses für wissenschaftliche Abläufe. Der bereits seit 2014 bestehende Konsens, ist noch nicht in vollen Umfang in der Gesellschaft angekommen. Die Wissenschaftskommunikation muss sich in diesem Fall noch stärker darauf konzentrieren, nicht nur die Ergebnisse der Forschung zu vermitteln, sondern auch die der Wissensbildung zugrunde liegenden Prozesse. Eine Hypothese wie die von Svensmark et al., die auf den ersten Blick wissenschaftlich plausibel aussieht, kann sich später als irrelevant herausstellen. Die Analyse der Herausbildung eines wissenschaftlichen Konsens zur GCR-Wolken-Hypothese in dieser Arbeit zeigt, dass Wissenschaftskommunikation darauf achten muss, Forschungsergebnisse nicht isoliert darzustellen. Sie müssen in einen zeitlichen Kontext gestellt werden, der die Veränderung des Wissensstandes deutlich macht. Gleichzeitig müssen aktuelle gesellschaftliche und politische Entwicklungen beobachtet werden, um diejenigen Akteure zu identifizieren, die mit Forschungsergebnisse argumentieren, die vielleicht in der Vergangenheit plausibel waren, es in der Gegenwart aber nicht mehr sind.

7 Literatur

Literatur

- [1] ALMEIDA, J., SCHOBESBERGER, S., KÜRTEEN, A., ORTEGA, I. K., KUPIAINEN-MÄÄTTÄ, O., PRAPLAN, A. P., ADAMOV, A., AMORIM, A., BIANCHI, F., BREITENLECHNER, M., DAVID, A., DOMMEN, J., DONAHUE, N. M., DOWNARD, A., DUNNE, E., DUPLISSY, J., EHRHART, S., FLAGAN, R. C., FRANCHIN, A., GUIDA, R., HAKALA, J., HANSEL, A., HEINRITZI, M., HENSCHER, H., JOKINEN, T., JUNNINEN, H., KAJOS, M., KANGASLUOMA, J., KESKINEN, H., KUPC, A., KURTÉN, T., KVASHIN, A. N., LAAKSONEN, A., LEHTIPALO, K., LEIMINGER, M., LEPPÄ, J., LOUKONEN, V., MAKHMUTOV, V., MATHOT, S., McGRATH, M. J., NIEMINEN, T., OLENIUS, T., ONNELA, A., PETÄJÄ, T., RICCOBONO, F., RIIPINEN, I., RISSANEN, M., RONDO, L., RUUSKANEN, T., SANTOS, F. D., SARNELA, N., SCHALLHART, S., SCHNITZHOFFER, R., SEINFELD, J. H., SIMON, M., SIPILÄ, M., STOZHKOY, Y., STRATMANN, F., TOMÉ, A., TRÖSTL, J., TSAGKOGEOORGAS, G., VAATTOVAARA, P., VIISANEN, Y., VIRTANEN, A., VRTALA, A., WAGNER, P. E., WEINGARTNER, E., WEX, H., WILLIAMSON, C., WIMMER, D., YE, P., YLI-JUUTI, T., CARSLAW, K. S., KULMALA, M., CURTIUS, J., BALTENSPERGER, U., , VEHKAMAKI, H., AND KIRKBY, J. Molecular understanding of sulphuric acid-amine particle nucleation in the atmosphere. *Nature* 502 (2013), 359–363.
- [2] ANDERSON, C. D. The apparent existence of easily deflectable positives. *Science* 76, 1967 (1932), 238–239.
- [3] BLAU, M., AND WAMBACHER, H. Disintegration processes by cosmic rays with the simultaneous emission of several heavy particles. *Nature* 140 (1937), 585.
- [4] BOTHE, W., AND KOLHÖRSTER, W. Das Wesen der Höhenstrahlung. *Zeitschrift für Physik* 56, 11–12 (1929), 751–777.
- [5] BOUCHER, O., RANDALL, D., ARTAXO, P., BRETHERTON, C., FEINGOLD, G., FORSTER, P., KERMINEN, V.-M., KONDO, Y., LIAO, H., LOHMANN, U., RASCH, P., SATHEESH, S., SHERWOOD, S., STEVENS, B., AND ZHANG, X. Clouds and aerosols. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. Midgley, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, book section 7, p. 571–658.
- [6] CALOGOVIC, J., ALBERT, C., ARNOLD, F., BEER, J., DESORGHIER, L., AND FLÜCKIGER, E. O. Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover. *Geophysical Research Letters* 37, 3 (2010), L03802.
- [7] CANE, H. V. Coronal mass ejections and forrush decreases. *Space Science Reviews* 93, 1–2 (2000), 55–77.
- [8] CANE, H. V. Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases. *Space Sci. Rev.* 93 (July 2000), 55–77.
- [9] CDS. Cern document server, July 2026. Web page, accessed 2026-07-23.

- [10] CHADWICK, J. Possible existence of a neutron. *Nature* 129, 3252 (1932), 312.
- [11] CHRISTOUDIAS, T., KIRKBY, J., STOLZENBURG, D., POZZER, A., SOMMER, E., BRASSEUR, G. P., KULMALA, M., AND LELIEVELD, J. Earth’s atmosphere protects the biosphere from nearby supernovae. *Communications Earth & Environment* 5, 1 (2024), 326.
- [12] CLAY, J. Penetrating radiation. *Proceedings of the Section of Sciences, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* 30, 9–10 (1927), 1115–1127.
- [13] DE JAGER, C. Solar Forcing of Climate. 1: Solar Variability. *Space Sci. Rev.* 120, 3-4 (Oct. 2005), 197–241.
- [14] DE LA FUENTE MARCOS, R., AND DE LA FUENTE MARCOS, C. On the correlation between the recent star formation rate in the Solar Neighbourhood and the glaciation period record on Earth. *Nature* 10, 1 (Nov. 2004), 53–66.
- [15] DERGACHEV, V. A., DMITRIEV, P. B., RASPOPOV, O. M., AND VAN GEEL, B. The effects of galactic cosmic rays, modulated by solar terrestrial magnetic fields, on the climate. *Russian Journal of Earth Sciences* 6, 5 (Nov. 2004), 323–338.
- [16] DESMOG CLIMATE DISINFORMATION DATABASE. Nicola scafetta, n.d. Web page, accessed 2026-07-02.
- [17] DICKINSON, R. E. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* 56, 12 (1975), 1240–1248.
- [18] DIRAC, P. A. M. The quantum theory of the electron. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* 117, 778 (1928), 610–624.
- [19] DORMAN, L. I. Estimation of long-term cosmic ray intensity variation in near future and prediction of their contribution in expected global climate change. *Advances in Space Research* 35, 3 (Jan. 2005), 496–503.
- [20] DUNNE, E. M., GORDON, H., KURTEN, A., ALMEIDA, J., DUPLISSY, J., WILLIAMSON, C., ORTEGA, I. K., PRINGLE, K. J., ADAMOV, A., BALTENSPERGER, U., BARMET, P., BENDUHN, F., BIANCHI, F., BREITENLECHNER, M., CLARKE, A., CURTIUS, J., DOMMEN, J., DONAHUE, N. M., EHRHART, S., FLAGAN, R. C., FRANCHIN, A., GUIDA, R., HAKALA, J., HANSEL, A., HEINRITZI, M., JOKINEN, T., KANGASLUOMA, J., KIRKBY, J., KULMALA, M., KUPC, A., LAWLER, M. J., LEHTIPALO, K., MAKHMUTOV, V., MANN, G., MATHOT, S., MERIKANTO, J., MIETTINEN, P., NENES, A., ONNELA, A., RAP, A., REDDINGTON, C. L. S., RICCOBONO, F., RICHARDS, N. A. D., RISSANEN, M. P., RONDO, L., SARNELA, N., SCHOBESBERGER, S., SENGUPTA, K., SIMON, M., SIPILA, M., SMITH, J. N., STOZKHOV, Y., TOME, A., TROSTL, J., WAGNER, P. E., WIMMER, D., WINKLER, P. M., WORSNOP, D. R., AND CARSLAW, K. S. Global atmospheric particle formation from CERN CLOUD measurements. *Science* 354, 6316 (2016), 1119–1124.
- [21] DUPLISSY, J., HAHN, F., REICHL, U., WINKLER, P. M., PEDERSEN, E., MAKHMUTOV, V., VIISANEN, Y., KULMALA, M., WILHELMSSON, M., WEINGARTNER, E., AVNGAARD, M., CURTIUS, J., VEENHOF, R., LAAKSO, L., GAGNE, S., HARRISON, R. G., SIPILA, M., DAVID, A., SEINFELD, J. H., NIEMINEN, T., VERHEGGEN, B., APLIN, K. L., STRATMANN,

- F., ARNOLD, F., MAKELA, J., KELLETT, B., FASTRUP, B., MARSH, N. D., LOCKWOOD, M., CARSLAW, K., WEHRLE, G., AUFMHOFF, H., PEDERSEN, J. O. P., BALTENSPERGER, U., ONNELA, A., LAAKSONEN, A., ENGHOFF, M. B., SVENSMARK, J., WEX, H., LILLESTOL, E., WAGNER, P. E., KIRKBY, J., STOZHOKOV, Y., POLNY, J., BONDO, T., BINGHAM, R., AND SVENSMARK, H. Results from the CERN pilot CLOUD experiment. *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 4 (2010), 1635–1647.
- [22] EBERT, K. H., AND WÄNKE, H. Über die Einwirkung der Höhenstrahlung auf Eisenmeteorite. *Zeitschrift Naturforschung Teil A* **12**, 10 (Oct. 1957), 766–773.
- [23] ECHTERMANN, A., AND ECKERT, T. Offener Brief zum Klimawandel: Weder haben "500 Wissenschaftler" unterzeichnet, noch stimmen alle Behauptungen, Oct. 2019. Web page, accessed 2026-07-02.
- [24] FANG, K., KERR, M., BLANDFORD, R., FLEISCHHACK, H., AND CHARLES, E. Evidence for pev proton acceleration from fermi-lat observations of snr g106.3+2.7. *Physical Review Letters* **129**, 7 (2022), 071101.
- [25] FARRAR, P. D. Are Cosmic Rays Influencing Oceanic Cloud Coverage — Or Is It Only El Nino? *Climatic Change* **47**, 1-2 (Oct. 2000), 7–15.
- [26] FORBUSH, S. E. On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. *Physical Review* **51** (1937), 1108–1109.
- [27] FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., FAHEY, D. W., HAYWOOD, J., LEAN, J., LOWE, D. C., MYHRE, G., NGANGA, J., PRINN, R., RAGA, G., SCHULZ, M., AND VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007, book section 2, pp. 129–234.
- [28] FORSTER, P., STORELVMO, T., ARMOUR, K., COLLINS, W., DUFRESNE, J.-L., FRAME, D., LUNT, D., MAURITSEN, T., PALMER, M., WATANABE, M., WILD, M., AND ZHANG, H. The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2021, book section 7, pp. 923–1054.
- [29] FREISTETTER, F. Strache und die Sonnenstürme: Wie der FPÖ-Chef mit falschen Behauptungen zum Klimawandel davontkommt, Sept. 2017. Web page, accessed 2026-07-06.
- [30] GAISSER, T. K., ENGEL, R., AND RESCONI, E. *Cosmic rays and particle physics*, second edition. ed. Cambridge University Press, Cambridge :, 2016.

- [31] GENSING, P., KUMPFMÜLLER, K., AND ARD-FAKTENFINDER. Debatte um Klimawandel: AfD macht die Sonne verantwortlich, June 2019. Web page, accessed 2026-07-06.
- [32] GÖHRING, A. John Clauser, Lutz Niemann, Henrik Svensmark, Nicola Scafetta, Willie Soon, William Happer, Stefan Kröpelin – die Elite der Klimaskeptiker, May 2026. Web page, accessed 2026-07-06.
- [33] GORDON, H., KIRKBY, J., BALTENSPERGER, U., BIANCHI, F., BREITENLECHNER, M., CURTIUS, J., DIAS, A., DOMMEN, J., DONAHUE, N. M., DUNNE, E. M., DUPLISSY, J., EHRHART, S., FLAGAN, R. C., FREGE, C., FUCHS, C., HANSEL, A., HOYLE, C. R., KULMALA, M., KÜRTE, A., LEHTIPALO, K., MAKHMUTOV, V., MOLTENI, U., RISSANEN, M. P., STOZKHOV, Y., TRÖSTL, J., TSAGKOGEOORGAS, G., WAGNER, R., WILLIAMSON, C., WIMMER, D., WINKLER, P. M., YAN, C., AND CARSLAW, K. S. Causes and importance of new particle formation in the present-day and preindustrial atmospheres. *J. Geophys. Res.* **122**, 16 (2017), 8739–8760.
- [34] GRUPEN, C. *Einstieg in die Astroteilchenphysik : Grundlagen, Messungen und Ergebnisse aktueller Forschung*, 2. Aufl. 2018 ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [35] HANSLMEIER, A. *Gefahr von der Sonne : Satellitenabstürze ; Zusammenbruch von Strom- und Funknetzen ; Klimaveränderungen ; Gesundheitsgefährdung*. BLV, München Wien [u.a.], 2000.
- [36] HANSLMEIER, A. *Einführung in Astronomie und Astrophysik*, 4 ed. Springer Spektrum, Berlin and Heidelberg, 2020.
- [37] HESS, V. F. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift* **13** (1912), 1084–1091.
- [38] HOUGHTON, J. T., FILHO, L. G. M., BRUCE, J., LEE, H., CALLANDER, B. A., HAITES, E., HARRIS, N., AND MASKELL, K., Eds. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995.
- [39] HOWARD, D., SHAVIV, N. J., AND SVENSMARK, H. The solar and Southern Oscillation components in the satellite altimetry data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **120**, 5 (May 2015), 3297–3306.
- [40] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2021.
- [41] JØRGENSEN, T. S., AND HANSEN, A. W. Comments on “variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships” by svensmark and friis-christensen. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **62**, 1 (2000), 73–77.
- [42] KERNTHALER, S. C., TOUMI, R., AND HAIGH, J. D. Some doubts concerning a link between cosmic ray fluxes and global cloudiness. *Geophysical Research Letters* **26**, 7 (1999), 863–865.
- [43] KIRKBY, J. Beam Measurements of a CLOUD (Cosmics Leaving OUTdoor Droplets) Chamber. *arXiv e-prints* (Apr. 2001), physics/0104041.

- [44] KIRKBY, J. CLOUD: a particle beam facility to investigate the influence of cosmic rays on clouds. *Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions* (2001).
- [45] KIRKBY, J., AMORIM, A., BALTENSPERGER, U., CARSLAW, K. S., CHRISTOUDIAS, T., CURTIUS, J., DONAHUE, N. M., HADDAD, I. E., FLAGAN, R. C., GORDON, H., HANSEL, A., HARDER, H., JUNNINEN, H., KULMALA, M., KÜRTEEN, A., LAAKSONEN, A., LEHTIPALO, K., LELIEVELD, J., MÖHLER, O., RIIPINEN, I., STRATMANN, F., TOMÉ, A., VIRTANEN, A., VOLKAMER, R., WINKLER, P. M., AND WORSNOP, D. R. Atmospheric new particle formation from the CERN CLOUD experiment. *Nature Geoscience* *16*, 11 (Nov. 2023), 948–957.
- [46] KIRKBY, J., CURTIUS, J., ALMEIDA, J., DUNNE, E., DUPLISSY, J., EHRHART, S., FRANCHIN, A., GAGNÉ, S., ICKES, L., KÜRTEEN, A., KUPC, A., METZGER, A., RICCOBONO, F., RONDO, L., SCHOBESBERGER, S., TSAGKOGEOORGAS, G., WIMMER, D., AMORIM, A., BIANCHI, F., BREITENLECHNER, M., DAVID, A., DOMMEN, J., DOWNARD, A., EHN, M., FLAGAN, R. C., HAIDER, S., HANSEL, A., HAUSER, D., JUD, W., JUNNINEN, H., KREISSL, F., KVASHIN, A., LAAKSONEN, A., LEHTIPALO, K., LIMA, J., LOVEJOY, E. R., MAKHMUTOV, V., MATHOT, S., MIKKILÄ, J., MINGINETTE, P., MOGO, S., NIEMINEN, T., ONNELA, A., PEREIRA, P., PETÄJÄ, T., SCHNITZHOFFER, R., SEINFELD, J. H., SIPILÄ, M., STOZH-KOV, Y., STRATMANN, F., TOMÉ, A., VANHANEN, J., VIISANEN, Y., VRTALA, A., WAGNER, P. E., WALTHER, H., WEINGARTNER, E., WEX, H., WINKLER, P. M., CARSLAW, K. S., WORSNOP, D. R., BALTENSPERGER, U., AND KULMALA, M. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature* *476* (2011), 429–433.
- [47] KIRKBY, J., AND LAAKSONEN, A. Solar Variability and Clouds - Discussion Session 3c. *Space Sci. Rev.* *94* (Nov. 2000), 397–409.
- [48] KOLHÖRSTER, W. Messungen der durchdringenden Strahlungen bis in Höhen von 9300 m. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* *16* (1914), 719–721.
- [49] KOTERA, K., AND OLINTO, A. V. The astrophysics of ultrahigh-energy cosmic rays. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* *49* (2011), 119–153.
- [50] KRISTJÁNSSON, J. E., AND KRISTIANSEN, J. Is there a cosmic ray signal in recent variations in global cloudiness and cloud radiative forcing? *J. Geophys. Res.* *105*, D9 (May 2000), 11851–11864.
- [51] KRISTJÁNSSON, J. E., KRISTIANSEN, J., AND KAAS, E. Solar activity, cosmic rays, clouds and climate - an update. *Advances in Space Research* *34*, 2 (Jan. 2004), 407–415.
- [52] KULMALA, M., RIIPINEN, I., NIEMINEN, T., HULKKONEN, M., SOGACHEVA, L., MANNINEN, H. E., PAASONEN, P., PETÄJÄ, T., DAL MASO, M., AALTO, P. P., VILJANEN, A., USOSKIN, I., VAINIO, R., MIRME, S., MIRME, A., MINIKIN, A., PETZOLD, A., HÖRRAK, U., PLASS-DÜLMER, C., BIRMILI, W., AND KERMINEN, V.-M. Atmospheric data over a solar cycle: no connection between galactic cosmic rays and new particle formation. *Atmospheric Chemistry and Physics* *10* (2010), 1885–1898.
- [53] KUSSEROW, U. v., AND MARSCH, E. *Magnetisches Sonnensystem : Solare Eruptionen, Sonnenwinde und Weltraumwetter*, 1st ed. 2023 ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2023.

- [54] LAKEN, B. A., PALLÉ, E., CALOGOVIC, J., AND DUNNE, E. M. A cosmic ray-climate link and cloud observations. *Journal of Space Weather and Space Climate* 2 (2012), A18.
- [55] LE MOUËL, J.-L., LOPES, F., AND COURTILLOT, V. A Solar Signature in Many Climate Indices. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 124, 5 (Mar. 2019), 2600–2619.
- [56] LÜDECKE, H.-J., AND WEISS, C.-O. Harmonic Analysis of Worldwide Temperature Proxies for 2000 Years. *The Open Atmospheric Science Journal* 11, 1 (June 2017), 44–53.
- [57] MILLIKAN, R. A., AND CAMERON, G. H. The origin of cosmic rays. *Physical Review* 32, 4 (1928), 533–557.
- [58] NASA EARTH SCIENCE. Solar irradiance science, 2026. Web page, accessed 2026-04-27.
- [59] NEDDERMEYER, S. H., AND ANDERSON, C. D. Note on the nature of cosmic-ray particles. *Physical Review* 51, 10 (1937), 884–886.
- [60] NEY, E. P. Cosmic radiation and the weather. *Nature* 183, 4659 (1959), 451–452.
- [61] OJAVEER, E., AND KALEJS, M. Long-term prediction on Baltic fish stocks based on periodicity of solar activity. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 22, 3 (Sept. 2012), 683–693.
- [62] OWENS, M. J., LOCKWOOD, M., HAWKINS, E., USOSKIN, I., JONES, G. S., BARNARD, L., SCHURER, A., AND FASULLO, J. The maunder minimum and the little ice age: An update from recent reconstructions and climate simulations. *Journal of Space Weather and Space Climate* 7 (2017), A33.
- [63] PALLÉ, E., AND BUTLER, C. J. The proposed connection between clouds and cosmic rays: cloud behaviour during the past 50-120 years. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64, 3 (Feb. 2002), 327–337.
- [64] PEREZ-BECKER, D., AND CHIANG, E. Surface Layer Accretion in Conventional and Transitional Disks Driven by Far-ultraviolet Ionization. *Astrophys. J.* 735, 1 (July 2011), 8.
- [65] RAHMANIFARD, F., JORDAN, A. P., DE WET, W. C., SCHWADRON, N. A., WILSON, J. K., OWENS, M. J., SPENCE, H. E., AND RILEY, P. Evidence from galactic cosmic rays that the sun has likely entered a secular minimum in solar activity. *Space Weather* 20, 2 (2022), e2021SW002796.
- [66] RAMASWAMY, V., BOUCHER, O., HAIGH, J., HAUGLUSTAINE, D., HAYWOOD, J., MYHRE, G., NAKAJIMA, T., SHI, G., AND SOLOMON, S. Radiative forcing of climate change. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001, book section 6, pp. 349–416.
- [67] RICHARDSON, J. D., KASPER, J. C., WANG, C., BELCHER, J. W., AND LAZARUS, A. J. Cool heliosheath plasma and deceleration of the upstream solar wind at the termination shock. *Nature* 454, 7200 (2008), 63–66.

- [68] SCAFETTA, N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 74 (Jan. 2012), 145–163.
- [69] SCAFETTA, N. Testing an astronomically based decadal-scale empirical harmonic climate model versus the IPCC (2007) general circulation climate models. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 80 (May 2012), 124–137.
- [70] SCAFETTA, N. High resolution coherence analysis between planetary and climate oscillations. *Advances in Space Research* 57, 10 (May 2016), 2121–2135.
- [71] SCAFETTA, N., MILANI, F., AND BIANCHINI, A. A 60-Year Cycle in the Meteorite Fall Frequency Suggests a Possible Interplanetary Dust Forcing of the Earth’s Climate Driven by Planetary Oscillations. *Geophys. Res. Lett.* 47, 18 (Sept. 2020), e89954.
- [72] SCAFETTA, N., MILANI, F., BIANCHINI, A., AND ORTOLANI, S. On the astronomical origin of the Hallstatt oscillation found in radiocarbon and climate records throughout the Holocene. *Earth Science Reviews* 162 (Nov. 2016), 24–43.
- [73] SCHIMMEL, D., ALVES, D., ENTING, I., HEIMANN, M., JOOS, F., RAYNAUD, D., WIGLEY, T., PRATHER, M., DERWENT, R., EHHALT, D., FRASER, P., SANHUEZA, E., ZHOU, X., JONAS, P., CHARLSON, R., RODHE, H., SADASIVAN, S., SHINE, K., FOUQUART, Y., RAMASWAMY, V., SOLOMON, S., SRINIVASAN, J., ALBRITTON, D., DERWENT, R., ISAKSEN, I., LAL, M., AND WUEBBLES, D. Radiative forcing of climate. In *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. Houghton, L. Meira Filho, B. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996, book section 2, pp. 65–131.
- [74] SCIX. Science explorer, funded by nasa under cooperative agreement 80nssc21m00561, July 2026. Web page, accessed 2026-04-27.
- [75] SEINFELD, J. H. Insights on global warming. *AIChE Journal* 57, 12 (Dec. 2011), 3259–3284.
- [76] SHAIKH, Z. I. *Study of cosmic ray response to large scale structures in interplanetary space*. PhD thesis, Indian Institute of Geomagnetism (IIG), India, Jan. 2021.
- [77] SHAVIV, N. J. Toward a solution to the early faint Sun paradox: A lower cosmic ray flux from a stronger solar wind. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 108, A12 (Dec. 2003), 1437.
- [78] SHINE, K., DERWENT, R., WUEBBLES, D., AND MORCRETTE, J.-J. Radiative forcing of climate. In *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report Prepared for IPCC by Working Group 1*, J. Houghton, G. Jenkins, and J. Ephraums, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990, book section 2, pp. 41–68.
- [79] SIME, R. L. Marietta blau: Pioneer of photographic nuclear emulsions and particle physics. *Physics in Perspective* 15, 1 (2013), 3–32.
- [80] SIMPSON, J. A. Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 33 (1983), 323–382.

- [81] SLOAN, T., AND WOLFENDALE, A. W. Testing the proposed link between cosmic rays and cloud cover. *Environmental Research Letters* 3, 2 (2008), 024001.
- [82] SLOAN, T., AND WOLFENDALE, A. W. Cosmic rays, solar activity and the climate. *Environmental Research Letters* 8, 4 (2013), 045022.
- [83] STEFANI, F., GIESECKE, A., SEILMAYER, M., STEPANOV, R., AND WEIER, T. Schwabe, gleissberg, suess-de vries: Towards a consistent model of planetary synchronization of solar cycles. *Magnetohydrodynamics* 56, 2–3 (2020), 269–280.
- [84] SVENSMARK, H. Influence of cosmic rays on earth’s climate. *Physical Review Letters* 81, 22 (1998), 5027–5030.
- [85] SVENSMARK, H. Supernova Rates and Burial of Organic Matter. *Geophys. Res. Lett.* 49, 1 (Jan. 2022), e96376.
- [86] SVENSMARK, H., ENGHOF, M. B., SHAVIV, N. J., AND SVENSMARK, J. Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei. *Nature Communications* 8 (Dec. 2017), 2199.
- [87] SVENSMARK, H., AND FRIIS-CHRISTENSEN, E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59, 11 (1997), 1225–1232.
- [88] THE CLOUD COLLABORATION. A study of the link between cosmic rays and clouds with a cloud chamber at the CERN PS. *arXiv e-prints* (Apr. 2001), physics/0104048.
- [89] UNSÖLD, A., AND BASCHEK, B. *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7 ed. Springer, Berlin and Heidelberg, 2002.
- [90] WDC-SILSO. Solar cycles min/max, n.d. Web page, accessed 2026-07-02.
- [91] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Jean-Louis Le Mouë, July 2026. Web page, accessed 2026-07-02; last edited 2026-07-02.
- [92] WILSON, A., Ed. *Proceedings of the 1st Solar and Space Weather Euroconference, 25–29 September 2000, Santa Cruz de Tenerife, Tenerife, Spain*, vol. 463 of *ESA SP*. ESA Publications Division, Noordwijk, Netherlands, 2000.

A Anhang

Tabelle 2: Literaturanalyse

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P	PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Calder	1999	1999EnEnv...10....1C			•				Although the details and some interpretations offered here will surely be improved, the overall impressions give strong support to the following unfashionable opinions: The Sun sets the level of carbon dioxide in the Earth's atmosphere by the cumulative effect of variations in the galactic cosmic rays reaching the Earth, as modulated by the variable solar wind.
NN	1999	1999PhuZ...30R..37.					•		Aus einer Abschätzung mit einem einfachen Modell folgert Svensmark, daß sich die Temperaturvariationen seit 1970 allein durch die Wirkung der kosmischen Strahlung erklären lassen. Die überwiegende Zahl der Klimaforscher steht dieser Hypothese ablehnend gegenüber.
Fields & Ellis	1999	1999NewA....4..419F					•		A strong correlation has been observed between solar activity (particularly the solar sunspot cycle) and the earth's cloud cover. It is thought that cosmic rays may help seed cloud formation, and it has been suggested that the correlation with the sunspot cycle might be due to the known modulation of the cosmic-ray flux during the solar cycle
Fangqun & Richard	2000	2000GeoRL..27..883Y					•		Such connections may ultimately lead to novel explanations for the correlation noted between variations in galactic cosmic ray fluxes and global cloud coverage
Kristjánsson & Kristiansen	2000	2000JGR...10511851K	•						When the results are related to temporal variations in cosmicray activity, we do not find support for a coupling between cosmic rays, total cloudiness, and radiative forcing of climate.
Svensmark	2000	2000SSRv...93..175S			•				A remarkable correlation between cosmic ray flux and variations in the Earth's cloud cover has been demonstrated. Since clouds are important for the Earth's energy balance, a solar influence on clouds could be the main cause for the observed correlations between the Sun and the Earth's climate.
Friis-Christensén	2000	2000ClCh...47....1F						•	NOTIZ: Keine Forschungsarbeit, nur Editorial Comment
Farrar	2000	2000ClCh...47....7F	•						The agreement which S&F-C found between the average ocean 60°N–60°S ISCCP C2 cloud coverage anomaly and the cosmic ray flux appears quite remarkable. Yet, this result does not prove robust when subjected to further analysis of the data.
Solanki et al.	2000	2000Natur.408..445S					•		It has been suggested that cosmic rays affect the total cloud cover of the Earth and thus drive the terrestrial climate.
Marsh & Svensmark	2000	2000SSRv...94..215M			•				This is consistent with low GCR corresponding to fewer low clouds and therefore a warmer climate.
Kirkby & Laaksonen	2000	2000SSRv...94..397K					•		New experimental data and better models are critically needed to investigate the apparent link between solar and cloud variability—and in particular to test the GCR hypothesis.
Friis-Christensén	2000	2000SSRv...94..411F					•		Solar activity effect on climate may work simultaneously through all the different possibilities, total irradiance variations together with UV variations and variations in the flux of energetic particles.
Marsh & Svensmark	2000	2000PhRvL..85.5004M			•				Based on the ISCCP D2 IR cloud data there is a clear correlation between GCR and properties of low clouds in contrast to middle and high clouds.
Wagner et al	2001	2001JGR...106.3381W					•		We therefore believe that the qualitative and quantitative role of the Sun in forcing the climate is still an open question
Fangqun & Richard	2001	2001JGR...106.4797Y		•					Moreover, simplified analytical approaches to the problem, which seem to capture the strong nonlinear behavior of this coupled ion, aerosol, vapor system as seen in the presents imulations, imply relatively low sensitivity of long-term aerosol populations to GCR variations.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Creer	2001	2001JRNC..247..705C				•		Climate changes stemming from solar variability have produced only second order ⁹ direct effects on the development of human communities
Pallé & Butler	2001	2001IJCli..21..709P	•					There was no significant correlation between sunshine factor and cosmic ray flux over the period since 1950 during which the cosmic ray flux has been measured.
Udelhofen & Cess	2001	2001GeoRL..28.2617U	•					The cloud cover variations are in phase with the solar cycle and not the GCR.
Lockwood	2001	2001JGR...10616021L				•		[...] the correlation became weaker when data for after 1992 became available [...] However, the correlation with cosmic rays appears to be as high as the anticorrelation with the solar irradiance and such an effect has not been predicted by coupled ocean-atmosphere climate models.
Lu & Sanche	2001	2001PhRvL..87g8501L					•	NOTIZ: Verwenden nur GCR-Grafik von Svensmark
Bay et al	2001	2001GeoRL..28.4635B					•	NOTIZ: erwähnt Svensmark nur als Anwendung für neue Methode zur Messung bei Eisbohrkernen
Mendoza et al	2001	2001JASTP..63.1891M			•			We conclude that the solar signal is probably present in the extreme minimum temperature records of the stations located in the central part of Mexico, but that other contributions such as man-induced changes and atmospheric effects are also present with paramount importance.
Castagnoli et al	2002	2002AdSpR..29.1537C			•			Higher solar activity corresponds to lower GCR flux, giving lower cloud coverage, thus reinforcing the effect of the enhanced irradiation.
Shaviv	2002	2002PhRvL..89e1102S				•		If the apparent correlation between observed CRF variations and climate on Earth is not simply a remarkable coincidence, an unavoidable question is what is the physical mechanism behind the CRF-temperature relation? Currently, there is no single undisputed mechanism through which cosmic rays can affect the climate.
Pallé & Butler	2002	2002JASTP..64..327P		•				The GCR-CC cannot be positively discounted at this time, at least for the last 20 years, for which satellite data is available. [...] It seems likely therefore, that the simplified scenario of cloud amount governed by solar activity (GCR) alone, is not valid as trends in cloudiness go the opposite way to predicted.
Iyudin	2002	2002JASTP..64..669I					•	A climate forcing related to, or enhanced by the neutral emission of the galactic SNe is an important conclusion which goes far beyond the scope of this paper and may need more proof and consideration
Rind	2002	2002Sci...296..673R	•					The GCR or the cloud response is not consistent with time; extending the record forward to the latter part of the 1990s produces no systematic change from the mid 1990s.
Scherer et al	2002	2002JASTP..64..795S			•			Short-term variations of the Earth environment related to solar activity appear to be of growing interest in various scientific communities.
Murata & Muraki	2002	2002NCimC..25..339M					•	We can now conclude that if the intensities of GCR and SPE are what are normally expected, they will not have a significant effect on the stratosphere.
Matthaeus et al	2002	2002PhPl...9.2440M					•	NOTIZ: Konferenzbericht über eine Veranstaltung bei der über Svensmarks paper geredet wurde
Sharma	2002	2002E&PSL.199..459S			•			The long-term solar activity and Earth's surface temperature appear to be directly related. [...] Further tests using high fidelity datasets, which give time-tuned geomagnetic field intensity and cosmogenic radionuclide production rates, would be needed to substantiate this hypothesis.
Mackay et al	2002	2002SoPh..207..291M					•	Two explanations linking the open solar flux and climate have been proposed
Mackay & Lockwood	2002	2002SoPh..209..287M					•	In recent years there has been much interest in studying through observations and theory both the open flux and the IMF since variations in both have been linked to variations in the Earth's climate.
Kristjánsson et al	2002	2002GeoRL..29.2107K	•					We conclude that this new analysis significantly weakens the evidence for the cosmic ray-cloud coupling suggested by Svensmark

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Shaviv	2003	2003NewA....8...39S					•	Thus, if indeed the CRF climate connection is real, the increased CRF witnessed while crossing the spiral arms could be responsible for a larger global cloud cover and a reduced temperature, thereby facilitating the occurrences of ice ages. This picture has been recently shown to be supported by various data
Tsiropoula	2003	2003JASTP..65..469T					•	An answer to the problem of the connection between cosmic ray flux and cloud radiative forcing may be provided by a team of atmospheric, solar-terrestrial and particle physicists, which has joined together to construct the cosmics leaving outdoor droplets (CLOUD) experiment
Marsh & Svensmark	2003	2003JGRD..108.4195M			•			The GCR-low cloud correlation cannot easily be explained by internal climate processes, changes in direct solar forcing, or UV-ozone interactions. Instead, it is argued that a mechanism involving solar variability via GCR ionization of the atmosphere is consistent with these results.
Marsh & Svensmark	2003	2003SSRv..107..317M			•			Support for this idea is found from satellite observations of cloud cover. Such data have revealed a striking correlation between the intensity of galactic cosmic rays (GCR) and low liquid clouds (≈ 3.2 km)
Laut	2003	2003JASTP..65..801L		•				My analyses show that the apparent strong correlations displayed on these graphs have been obtained by an incorrect handling of the physical data.
Shaviv	2003	2003JGRA..108.1437S					•	We show here that it can be partially resolved once we consider the cooling effect that cosmic rays are suspected to have on the global climate and by considering that the younger Sun must have had a stronger solar wind such that it was more effective at stopping cosmic rays from reaching Earth.
Wood	2004	2004LRSP....1....2W					•	However, the whole idea of cosmic rays influencing the terrestrial climate to this degree remains very controversial
Pallé et al	2004	2004JASTP..66.1779P			•			We show that, under the most favorable conditions, a reduction in low cloud cover since the late 19th century, combined with the direct forcing by solar irradiance can explain a significant part of the global warming over the past century, but not all.
Pudovkin	2004	2004IJGA....5.2007P			•			However, even this enumeration convincingly demonstrates that combined efforts of scientists all over the world are needed to solve the problem
Patterson et al	2004	2004SedG..172...67P					•	A growing body of sedimentary and biological studies indicates that extraterrestrial factors are at least partially responsible for climate variability on scales ranging from days to millennia
Dergachev et al	2004	2004RuJES...6..323D			•			Nevertheless, although there is a strictly substantiated correlation between the galactic cosmic rays, modulated by the solar and geomagnetic fields, and climate over different time scales, further research need be carried out to prove a physical relationship among the galactic cosmic rays, the solar and terrestrial fields, and the orbital movements of the Earth.
de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos	2004	2004NewA...10...53D					•	Although the exact causes for glaciation episodes, and the ice ages cycles within them, are still far from being well established, the astrophysical data discussed in this paper strongly suggest that galactic dynamics plays a primary role in the long-term evolution of global climate on Earth. T
Hiremath & Mandi	2004	2004NewA....9..651H					•	it is suggested that solar activity may be included as one of the crucial parameter in modeling and predicting the Indian monsoon rainfall.
Pustil'nik & Din	2004	2004SoPh..223..335P					•	We consider these results a direct evidence of the causal connection between wheat prices bursts and solar activity.
Wendler	2004	2004JASTP..66.1195W			•			This review paper shows that geological history is linked to galactic forcing in which magnetic control of the cosmic ray flux played a significant role. The hypotheses put forward here merit evaluation by detailed investigations.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Wallmann	2004	2004GGG.....5.6004W			•			Svensmark's hypothesis that short-term variations in GCR induced by solar activity change contribute significantly to natural climate variability is confirmed by the new results presented in this paper.
Kokhanovsky	2004	2004ESRv...64..189K					•	Swensmark and Friis-Christensen (1997) and Marsh and Swensmark (2000) have speculated that cosmic ray ionization could influence the production of condensation nuclei and, therefore, cloud properties
Tinsley & Yu	2004	2004GMS...141..321T			•			Both IMN and electroscavenging depend on the presence of atmospheric ions that are generated, in regions of the atmosphere relevant for effects on clouds, by galactic cosmic rays (GCR).
Mendoza et al	2004	2004AdSpR...34..416M		•				We perform an analysis of two recent reconstructions of the terrestrial temperature and the cosmogenic isotope ^{10}Be , considered as a proxy of the cosmic ray flux, for the period 1580–1985. We find that the ^{10}Be is ambiguously related to temperature on secular time scales, as one record shows no relation, and the other one presents an anticorrelation.
Kristjánsson et al	2004	2004AdSpR...34..407K		•				A cosmic ray modulation seems less likely, but can not be ruled out on the basis of the present analysis.
Lucio	2005	2005GeoRL...3223819L					•	Several works have explored various possible effects on cloud formation and precipitation processes of ionisation by both galactic cosmic rays and energetic particles of solar origin.
Tanaka	2005	2005JASTP...67.1544T			•			Based on the simulation results, we estimated the influence of GCR modulation on the ion production rate during the last 11-year solar cycle. The estimated variation in the nucleation rate was $\sim 1.0\%$ between the solar maximum and minimum. The simulation result may explain the observed variation of low clouds by $\sim 1.7\%$.
de Jager	2005	2005SSRv...120..197D					•	Clearly, the assumed cosmic ray-cloud connection is not yet satisfactorily solved.
Shaviv	2005	2005JGRA...110.8105S			•			Subject to the above caveats and those described in the text, the CRF/climate link therefore implies that the increased solar luminosity and reduced CRF over the previous century should have contributed a warming of $0.47 \pm 0.19^\circ\text{K}$, while the rest should be mainly attributed to anthropogenic causes
Chang et al	2005	2005PPP...226...72C					•	There is now a growing body of evidence that suggests that celestial and solar factors are at least partially responsible for climate variability from daily to millennial timescales
Tammet & Kulmala	2005	2005JAerS...36..173T					•	The role of ions in the particle generation and evolution is a subject of heated discussions, because the air ionization depends on the extraterrestrial processes and may be a mediator of extraterrestrial factors in the Earth's climate
Shaviv	2005	2005IJMPA...20.6662S					•	We discuss the problem of cosmic ray diffusion in the Milky Way and show that the spiral arm dynamics gives rise to a ≈ 150 Myr periodic modulation of the cosmic ray density in the vicinity of the solar system.
Borrmann & Fichtner	2005	2005AdSpR...35.2091B					•	At the same time, the evidence for an influence of the Earth's climate by cosmic rays is growing and, therefore, the study of their interaction with the heliosphere is of increasing significance.
Fichtner	2005	2005AdSpR...35..512F					•	However, various terrestrial climate drivers like, e.g., temperature, lightning and cloud coverage of the Earth correlate well with energetic particle intensities on short time scales
Dorman	2005	2005AdSpR...35..496D			•			From our results and Fig. 4, it follows that the global influence of long-term CR intensity variation on the planetary climate is comparable with expected global warming caused by increasing of green gases, and may be several times bigger than direct influence of solar irradiation's solar cycle variation.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Belov et al	2005	2005AdSpR..35..491B			•			A very important result for an understanding of the mechanism of the influence of solar activity cycle on the Earth's climate has recently been obtained: it was found that the Earth's cloud coverage (observed by satellites) is strongly correlated with CR intensity
Dorman	2006	2006AdSpR..37.1621D			•			(...) it is necessary to mention that there are also scientists and results which do not agree much with the general conclusion of Svensmark and Friis-Christensen
Gómez & Mininni	2006	2006AdSpR..38..856G					•	However, a correct assessment of the impact of these changes can only be made once all the relevant physical mechanisms are known
Mackay & van Ballegooijen	2006	2006ApJ...642.1193M					•	The reason is that variations in the open flux have been linked to variations in the Earth's climate, as well as to many effects in the near-Earth environment studied as part of space weather.
Tammet et al	2006	2006ACP.....6.3377T					•	The role of air ions in particle formation is an often-discussed question.
Bard & Frank, Martin	2006	2006E&PSL.248....1B	•					It should be emphasized that the hypothesis is still very poorly quantified on several levels, such as the relationship between cosmic rays and clouds
Lockwood	2006	2006SSRv..125...95L			•			Thus these data do argue for a direct effect and not just via the anticorrelation of TSI with cosmic rays which mis most apparent on timescales of a year or greater.
Ogurtsov & Lindholm, Markus	2006	2006EnEnv..17..685O				•		Thus, the origin of the rise of global temperature should be considered to be unknown due to a lack of adequate knowledge about any of the factors that may be responsible for this phenomenon (the greenhouse effect, the rise of solar activity, natural climatic variability, regional anthropogenic impact etc.).
Svensmark	2006	2006AN....327..866S			•			The surprisingly high correlation between CR levels and variability in the biosphere points to a linkage between events in the Milky Way and on the Earth not previously known to geologists and paleontologists.
Svensmark	2006	2006AN....327..871S			•			A possible connection between climate and the Solar system's motion perpendicular to the Galactic plane during the last 200 Myr has been found
Tammet	2006	2006AtmRe..82..523T					•	One of the key problems is the role of the ion-induced mechanism in the real atmosphere
de Jager & Usoskin	2006	2006JASTP..68.2053D		•				Therefore, we can conclude that in so far as the Sun-climate connection is concerned tropospheric temperatures are more likely affected by variations in the UV radiation flux rather than by those in the CR flux.
Scherer et al	2006	2006SSRv..127..327S				•		There is evidence from historical sunspot observations and cosmogenic archives that both forcing processes could have been responsible for this climate variation so that, unfortunately, no decision can be expected unless the 22-year Hale cycle is detected in the data.
Nandy & Martens	2007	2007AdSpR..40..891N					•	Cosmic rays ionize matter in the Earth's atmosphere and are therefore believed to play a role in seeding cloud formation
Passos et al	2007	2007AdSpR..40..990P					•	The Sun's variability on several time scales is increasingly invoked as a driver for the Earth's climate and there are several mechanisms of interaction proposed.
Courtillot et al	2007	2007E&PSL.253..328C			•			We see that no forcing factor, be it changes in CO2 concentration in the atmosphere or changes in cosmic ray flux modulated by solar activity and geomagnetism, or possibly other factors, can at present be neglected or shown to be the overwhelming single driver of climate change in the past century.
Svensmark et al	2007	2007RSPSA.463..385S			•			The experiment indicates that ions play a role in nucleating new particles in the atmosphere and that the rate of production is sensitive to the ion density. If this sensitivity is still relevant at the size of cloud condensation nuclei, one might expect to find a relationship between ionization and cloud properties.
Höppner & Bittner	2007	2007JASTP..69..431H					•	An interesting correlation has been found between global average of cloud cover and the flux of cosmic rays incident on the atmosphere (e.g. Svensmark, 1998).

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
De Freitas et al	2007	2007NIMPA.580..644D					•	Cosmic radiation has effects on many global processes, such as: (I) formation of tropospheric aerosols, through ion-induced nucleation; (II) influence on Earth's climate
Sternal et al	2008	2008A&A...477..365S					•	These high-energy particles are able to influence the climate on Earth.
van der Linden et al	2008	2008PPP...258....1V					•	Recently, a causal mechanism has been found by which cosmic rays can facilitate the production of clouds, low-level mclouds particularly.
Rohwetter et al	2008	2008OptCo.281..797R					•	Namely, a thorough analysis of the global cloud coverage variation between 1984 and 1994 revealed clear correlation with the modulation of energetic cosmic rays' flux, well known as a most relevant source of atmospheric ionization-
Isaksen et al	2008	2008ACPD....8.4353I		•				Finally it has also been suggested that changes in TSI can alter clouds. The latter effect is controversial and it is highly uncertain if such a mechanism exists at all, or whether it is significant in magnitude.
Usoskin & Kovaltsov	2008	2008CRGeo.340..441U			•			In conclusion, a CR-climate link seems to be a plausible climate driver, as supported by the bulk of statistical studies and existing theoretical models. However, further studies, in particular a clear case study as well as improved model development, are foreseen to improve our understanding of the link between cosmic rays and the climate on Earth.
Malnes, Raino	2008	2008EnvPo..17..660M					•	By contrast, the theory of natural variability says that global mean temperature shifts owing to many factors, notably variations in solar radiation.
Veretenenko & Tejll	2008	2008Ge&Ae..48..518V					•	At present, fluxes of solar and galactic cosmic rays with energies from ~0.1 to several gigaelectronvolts are considered as one of the most important links between solar activity and the lower atmosphere.
Maruyama & Santosh	2008	2008GondR..14...22M					•	All of these events show good correlation to support galactic control on Snowball (after Svensmark, 2007).
Velinov et al	2008	2008ARBl...22...24V					•	Several possible causes of global climate change have been discussed in scientific literature
Bondur et al	2008	2008DokES.422.1124B			•			Variations in the cosmic rays (including short-period variations) are an important factor in the formation of the cloud cover and heat balance of the upper tropospheric layers.
Shaviv	2008	2008JGRA..11311101S				•		Given that the CRF/climate links predicts the correct radiation imbalance observed in the cloud cover variations, it is a favorable candidate.
Weon & Je	2008	2008ApPhL..93x4105W				•		In this study, we suggest that surface tension reduction by cosmic ray ionization might be a possible microphysical link between cosmic rays, clouds, and climate.
Vasilyev et al	2008	2008JASTP..70.2000V					•	This in turn gives rise to the hard UV emission reaching the surface of the Earth and/or to the condensation centers in the troposphere mresulting in the growth of atmospheric clouds
Usoskin	2008	2008LRSP....5....3U				•		Accordingly, improved knowledge of the solar driver's variability may help in disentangling various effects in the very complicated system that is the terrestrial climate
Lu	2009	2009PhRvL.102k8501L					•	There is interest in studying the effects of galactic cosmic rays (CRs) on Earth's climate and environment, particularly on global cloud cover in low atmosphere (i= 3 km)
Höppner & Bittner	2009	2009JASTP..71.1287H					•	A correlation has also been found between global average cloud cover and the flux of cosmic rays modulated by the solar magnetic field (e.g. Svensmark, 1998).
SibbernSEN	2010	2010AEdRv...9a0111S					•	Cosmic ray flux variation of less than 10 % at a given location has been used to study solar effects and changes in the Earth's climate (Svensmark 1998).
Paetzel & Dale	2010	2010GSLSP.344..271P			•			Figure 7 indicates a regional and northern hemispheric temperature increase during times of low cosmic ray measurements, which is consistent with the cosmic ray theory

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Le Mouél et al	2010	2010JASTP..72...62L				•		Another much studied possible link that could connect solar mactivity and climate variations is the effect of cosmic rays on cloud formation in the atmosphere (e.g. Svensmark, 1998).
Takahashi et al	2010	2010ACP....10.1577T				•		Therefore, the proposed connection between 27-day cloud variation and solar cycle in the WPWP region is still a hypothesis
Veretenenko et al	2010	2010AdSpR..45..391V			•			Thus, we can suggest that the temperature field of the high-latitudinal troposphere is sensitive to the rate of GCR variations in the 11-yr solar cycle
Lu	2010	2010PhR...487..141L				•		Overall, the direct CR–cloud (PSC) correlation remains a subject of significant controversy.
Rusov et al	2010	2010JASTP..72..398R			•			At the same time, it has to be noted that researchers do not have a clear understanding when the GCR modulation in the abovementioned causal connection corresponds to the description of weather (stochastic by its nature) only, and when it corresponds to the stochastic or quasi-deterministic global climate.
Bal & Bose	2010	2010JESS..119..201B		•				Variation of solar activity reaching the Earth is thought to influence precipitation, but we are still searching for better physics to understand how the periodic variation of the solar activity influences the variation of the precipitation of land.
Weon & Je	2010	2010ApPhL..96s4101W			•			In conclusion, we shed light on a possibility of charge induced wetting phenomena for atmospheric aerosols, which mwould affect cloud properties and hence climate changes.
Wang et al.	2010	2010EES....60.1257W			•			But in the twentieth century, solar cycle variations and their influences have been stable. The influence of Global warming increases during the two high-temperature phases.
Weber	2010	2010AnP...522..372W			•			The contribution of the active sun, indirectly via cosmic rays, to global warming appears to be much stronger than the presently accepted upper limit of 1/3. However, to really confirm this view, it is necessary to study the properties of atmospheric small ions and droplets in great detail
Ojaveer & Kalejs	2010	2010RFBF...20..203O					•	Presently the dependence of climatic processes and marine systems on solar/cosmic factors does not evoke any serious hesitation
Styro et al	2010	2010JEELM...18..226S					•	Further, it is also important to explore whether any such climatic variations have a linkage with the geomagnetic activity
Kikuch	2010	2010EnEnv..21..953K					•	There are still uncertainties about the scientific relation between cosmic rays and climate change because there is no observational evidence in the atmosphere and only a small portion of aerosol particles are capable of acting as nuclei
Bankoti et al	2011	2011QuInt.229....8B			•			Thus any change in the GCR activity may subsequently affect the rainfall variability.
Frederick & Hodge	2011	2011ACP....11.1177F				•		The possibility that clouds are linked to solar activity has appeared in the literature, although the concept is controversial and conflicting results exist.
Johnson	2011	2011Ap&SS.332...73J					•	That solar magnetic activity correlates with various geophysical processes is now well established .
Mörner	2011	2011EnEnv..22..207M			•			In a number of papers, Svensmark (e.g. 1998, 2007) has proposed that Earth climate may be strongly controlled by cloud formation driven by cosmic rays which, in its turn, is modulated by the interaction of the Solar Wind with the Earth's geomagnetic field. [...] This is a splendid new theory.
Hovhannisyan & Chilingarian	2011	2011AdSpR..47.1544H					•	SCR have a major influence on the Earth, safety of satellites, electrical lines and pipelines on and under the Earth's surface and also probably climate .
Perez-Becker & Chiang	2011	2011ApJ...735....8P					•	Moreover, the anti-correlation between the terrestrial cosmic ray flux and Solar activity has been clearly observed over many Solar cycles (Svensmark 1998).
Singh et al	2011	2011AtmEn..45.3806S					•	Based on the discussions presented above, the following problems are recommended for further investigations [...]: To investigate the mechanism, if any, by which cosmic rays affect clouds and hence the weather and climate.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Muraleedharan et al	2011	2011JASTP..73.1988M					•	According to Svensmark (1998), the cosmic ray flux produced during the period of solar eclipse may have some effect on meteorological parameters in the lower atmosphere.
Muraki et al	2011	2011ASTRA...7..395M			•			Once again we describe our conclusion here that our analysis on the annual growth rate clearly shows a possible effect of solar activity to the climate.
Seinfeld	2011	2011AICHe..57.3259S	•					For a demonstrable effect of galactic cosmic rays on climate, it would be necessary that the cosmic ray flux exhibit a clear and significant long-term downward trend. Such a trend, however, is not seen.
Ahluwalia	2011	2011JGRA..11612106A					•	The underlying hypothesis (unverified experimentally) is that cosmic rays, modulated by solar activity, influence cloud formation, therefore temperature.
Ahluwalia & Ygbuha	2012	2012AdAst2012E...8A					•	So, the natural versus anthropogenic causes of global warming debate is likely to continue for a while, yet we still do not know as much as we think we know.
Scafetta	2012	2012JASTP..74..145S					•	The major implication of this paper is that there exists an astronomical harmonic modulation of the electric properties of the Earth's atmosphere that modulates the clouds and, therefore, the terrestrial albedo.
Agee et al	2012	2012JCli...25.1057A	•					It is concluded that the observational results presented, showing several years of disconnect between GCRs and lower-troposphere global cloudiness, add additional concern to the cosmic ray–cloud connection hypothesis.
Hempelmann & Weber	2012	2012SoPh..277..417H			•			We suspect the cosmic rays intensity as the link between solar activity and atmospheric transparency.
Scafetta	2012	2012JASTP..80..124S					•	We believe that the oscillations found in the historical mid-latitude aurora record are quite important because reveal the existence of equivalent oscillations in the electric properties of the atmosphere, which can regulate the cloud system
Blanter et al	2012	2012JASTP..80..195B		•				This suggests that UV emission rather than GCR is at the origin of the Schwabe-like cycle in MJO “short” periods (e.g. 30–60 day).
Svensmark	2012	2012MNRAS.423.1234S			•			The hypothesis that a high GCR flux should coincide with cold conditions on the Earth is borne out by comparing the general geological record of climate over the past 510 Myr with the fluctuating local SN rates.
Ziskin & Shaviv	2012	2012AdSpR...50..762Z			•			Thus, we conclude like Shaviv (2008), that an additional solar activity amplification mechanism should exist.
Ojaveer & Kale- js	2012	2012RFBF...22..683O					•	A number of studies have shown that the changes in climate depend on solar activity/extraterrestrial factors
Mackay & Yea- tes	2012	2012LRSP....9....6M					•	The open flux has been correlated with cloud cover variations , however, any relation to global warming is very uncertain
Velinov et al	2013	2013JSWSC...3A..14V		•				However, the relation between cloudness and GCR is still a matter of debate and some recent results, particularly those related to the last deep and long solar minimum, make this relation questionable
Benestad et al	2013	2013ESDD....4..451B					•	NOTIZ: Publikation zurückgezogen
Schröder et al	2013	2013A&A...554A..50S					•	there may be other indirect, positive feedback mechanisms at work, for example, changes in cloud cover (Svensmark 1998)
Priem	2013	2013EnEnv..24..361P			•			A second external forcing mechanism is the flux of galactic cosmic rays that reaches the Earth and appears to affect its cloud cover.
Lu	2013	2013IJMPB..2750073L			•			the observed, analytical and theoretical results presented lead to a convincing conclusion that both the CRE mechanism and the CFC-warming mechanism not only provide new fundamental understandings of the O3 hole and global climate change but have superior predictive capabilities, compared with the conventional models.
Benestad	2013	2013ERL.....8c5049B	•					Hence, there is little empirical evidence that links GCR to the recent global warming.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P	PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Mörner	2013	2013PRP.....1..107M				•			A third way of affecting climate is via the cloud formation as a function of cosmic ray flux
Katzav	2013	2013SHPMP..44..433K						•	NOTIZ: Svensmark wird nur in Fussnote erwähnt
Avila et al	2013	2013IJHFF..44..495A						•	in recent years, yet another motivation has arisen, namely, the fact that the magnetic field of the Earth, which is generated by convection, has an influence on the dynamics of the atmosphere and perhaps on the global warming, this is the base of the new Cosmoclimatology theory
Usoskin	2013	2013LRSP...10....1U						•	Alternatively, an indirect mechanism also driven by solar activity, such as ionization of the atmosphere by CR or the global terrestrial current system can modify atmospheric properties, in particular cloud cover
Atri & Melott	2014	2014APh....53..186A						•	The role of cosmic rays affecting the cloud cover and its impact on the climate has been a topic of intense debate
Julkarni & Singh	2014	2014AtmRe.143..129K						•	We make an hypothesis that: 'the CRF and the NLF are in statistically significant relationship only when the CRF is significantly correlated with the meteorological parameters'
Shaviv et al	2014	2014NatSR...4.6150S						•	Second, the cosmic ray climate link is controversial and it should therefore not be taken for granted.
Rossi et al	2014	2014QSRv...102..166R						•	for instance, increases in cosmic-ray flux during periods of low geomagnetic intensity may hypothetically enhance cloud formation and eventually contribute to tropospheric cooling
Magee et al	2014	2014BAMS...95.1741M	•						In addition, the finding that subsequent sunshine fraction is positively correlated with cosmic ray incidence differs from the result that would be expected if cosmic ray-induced cloud nucleation played a significant climatological role in cloud formation.
Lüdecke et al	2015	2015CliPD..11..279L						•	NOTIZ: Publikation zurückgezogen
Tsonis et al	2015	2015PNAS..112.3253T	•						Despite a gross correlation, we find no measurable evidence of a causal effect linking CR to the overall 20th-century warming trend
Howard et al [Svensmark]	2015	2015JGRA..120.3297H				•			Nevertheless, it should be noted that the solar/CRF/climate link is still debated in the literature, partially because an exact chemical or physical mechanism is still missing and partially because some of the empirical evidence is disputed
McCrea et al	2015	2015PEPS....2...21M						•	It is believed that cosmic rays may be able to modulate cloudiness
Alexeev	2016	2016SoSyR...50...24A						•	However, the problem of the relation between the GCR intensity variations and the climatic changes remains under discussion
Scafetta	2016	2016AdSpR...57.2121S				•			this methodology confirms that the climate system can be partially modulated by astronomical forces of gravitational and solar origin with a 95 % confidence level.
Gonsamo et al	2016	2016ESD.....7..717G	•						The recent multidecadal warming of Northern Hemisphere surface temperature cannot be explained by natural variability, or by any known mode of internal variability
Scafetta et al	2016	2016ESRv...162...24S				•			Indeed, numerous empirical evidences and theoretical considerations have pointed out that cosmic rays can contribute to the formation of clouds and, therefore, modulate the Earth's albedo by ionizing the atmosphere
Benestad et al	2016	2016ThApC.126..699B	•						A handful of papers have provided a basis for videos with titles such as "The Global Warming Swindle" "The cloud mystery"
Lüdecke & Weiss	2017	2017OASJ...11...44L				•			We provide a new confirmation for the link between solar activity and climate cycles by wavelet analysis showing a remarkably good agreement of the power of the ~190 - year period for temperatures and solar activity over 9000 years
Vršansky et al	2017	2017Biolg..72..886V						•	The influence of cosmic rays on the climate was obscured and did not explain the observed periodicity.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Usoskin	2017	2017LRSP...14....3U					•	Alternatively, an indirect mechanism also driven by solar activity, such as ionization of the atmosphere by CR or the global terrestrial current system can modify atmospheric properties, in particular cloud cover
Svensmark et al	2017	2017NatCo...8.2199S				•		It should be stressed that there is not just one effect of CCN on clouds, but that the impact will depend on regional differences and cloud types. In regions with a relative high number of CCN the presented effect will be small, in addition the effect on convective clouds and on ice clouds is expected to be negligible
Vieira et al	2018	2018ERL....13b4009V					•	Observations have shown that many large short-term increases in the CR flux from nearby supernovae are strongly associated with the cooling of the Earth's climate and biodiversity crises over the past million years
Kumar et al	2018	2018SGeo...39..861K				•		Cosmic rays are thought to affect the total cloud cover of the Earth and thus provide a driver for the terrestrial climate, although the physical mechanism underlying the link is still poorly understood
Campuzano et al	2018	2018PLoS...1307270C					•	Although this work seems to provide a favorable argument to this link, future investigations are needed to completely exploit this issue, for example to check other time series at longer timescales.
Le Mouél et al	2019	2019JGRD..124.2600L				•		Both UV and cosmic ray mechanisms (strongly modulated by solar activity) can therefore act on cloud formation mechanisms and extent of cloud cover and thus modify the heat budget of the atmosphere
Hoffmann & von Savigny	2019	2019ACP....19.4235H	•					Another mechanism, particularly for a connection between clouds and the solar variability, has been proposed in a few variants but has also been heavily criticized and is mentioned here only for completeness
Gillman & Erenler	2019	2019GeoFr..10.2147G					•	The timing of key events in the history of the Earth, including major extinctions and glaciations, and the origin of the Solar System, can be reconciled with a model of passage through the spiral arms.
Smith et al	2019	2019M&PS...54.2951S	•					In this respect, our data together with the other studies clearly contradict the hypothesis of periodic GCR intensity variations as proposed by Shaviv. However, the number of events is still too low to allow for statistically significant conclusions.
Kilifarska et al	2020	2020GSLSP.497..205K	•					The latest publication by Dunne et al. shows undoubtedly that 'variations in cosmic ray intensity does not significantly affect climate via nucleation in the present day atmosphere'
Sing & Bhargawa	2020	2020AdSpR..65.1831S				•		The question of cloud cover - cosmic ray links remains controversial and requires further experimental and theoretical studies
El-Borie et al	2020	2020InJPh..94..737E		•				It seems the TSI is the best parameter to the observed change in the GST.
Geryl & Alvestad	2020	2020Ap&SS.365..113G					•	Putting the 10.7 radio flux on a strong footing with the sunspot number is important because solar magnetic activity correlates with various geophysical processes
Scafetta et al	2020	2020GeoRL..4789954S					•	Svensmark (1998) proposed that the cosmic-ray influx could somehow modulate the cloud formation.
Smulsky	2020	2020IzAOP..56..721S					•	
Shaikh	2021	2021PhDT.....81S					•	NOTIZ: Ist Doktorarbeit
Yanchukovsky	2021	2021STP.....7a..67Y					•	It has been established that the cloud cover S and CR intensity I variations are related
Nikolov et al	2021	2021AJ....162...88N					•	Galactic and solar cosmic rays, mainly protons, reaching Earth's atmosphere carry enough energy to ionize volatile compounds causing them to condense into droplets, or maerosols, and enhance cloud formation
Bhargawa & Singh	2021	2021AdSpR..68.2643B					•	The flux of galactic cosmic rays at 1 AU is modulated by the solar cycle

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Authors	Jahr	ADS Bibcode	N	NN	Bewertung P PN	Ne	Irr	repräsentatives Zitat
Goode et al	2021	2021GeoRL..4894888G	•					Our data, therefore, do not support an argument for any detectable imprint of direct or indirect solar activity mechanisms on the Earth's reflectance over the past two decades.
Briki et al	2022	2022APh...13402657B					•	
Svensmark	2022	2022GeoRL..4996376S			•			A high cosmic ray flux results in increased cloudiness and a colder climate
Thomas & Abraham	2022	2022JASTP.24005943T					•	Indirect indicators of rainfall such as droughts, snowfall, and the water level in lakes and rivers were also studied
Ollila & Timonen	2022	2022IJCli..4210407O					•	NOTIZ: Artikel zurückgezogen
Thomas et al	2023	2023NewA...9801944T					•	There are several shreds of evidence from the literature showing the solar influence on rainfall in different parts of the world, over varying time scales
Kumar et al	2023	2023NatSR..13.3707K		•				It is therefore unlikely that cosmic ray intensity can affect present-day climate via nucleation theory
Tinsley	2023	2023BAMS..104E2171T	•					However, the mechanism of ion-mediated nucleation, first proposed by Dickinson (1975) and which has been developed by Svensmark and Friis-Christensen (1997), Svensmark (1998), and Yu (2002), has been shown to be not viable.
Usoskin	2023	2023LRSP...20....2U					•	Alternatively, an indirect mechanism also driven by solar activity, such as ionization of the atmosphere by CR (Usoskin and Kovaltsov, 2006) or the global terrestrial current system (Golubenko et al. 2021; Tinsley and Zhou, 2006) can modify atmospheric properties, in particular cloud cover
Yanchukovsky	2024	2024STP....10d..59Y					•	The observed variations in atmospheric parameters are assumed to be due to changes in the ionization rate under the influence of cosmic rays in variations in atmospheric transparency and cloudiness.
Farghaly & Tharwat	2025	2025IJAA...15..218F				•		However, many subsequent researches have questioned the validity of those conclusions, ensuing in a whole lot of interpretations
Maghrabi et al	2025	2025JASTP.27006509A					•	These ionization events modify the atmosphere's physical, chemical, and electrical properties, influencing processes such as cloud formation, precipitation patterns, and aerosol generation, which in turn impact downward longwave radiation and broader climate dynamics
Maghrabi et al	2025	2025JASTP.27006509M					•	NOTIZ: Identisch mit 2025JASTP.27006509A
Mizerit et al	2025	2025Geomo.48509836M						
Dorn et al	2026	2026ESAt....6..736D				•		There are observations that CR influences atmospheric properties such as cloud formation and ozone in the stratosphere.